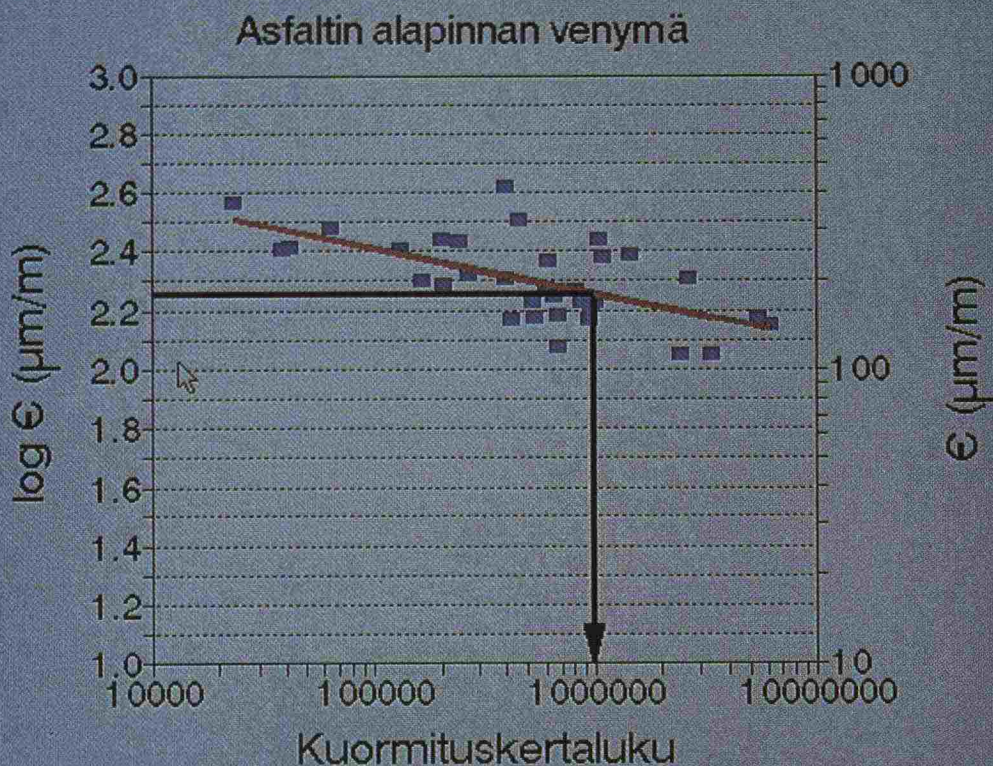




Tielaitos

Matti Huhtala, Timo Kurki, Reijo Orama, Jari Pihlajamäki,
Antti Ruotoistenmäki

Väsymissuorat tierakenteen mitoitusta varten



Tielaitoksen
selvityksiä

47/1993

Helsinki 1993

Geokeskus
VTT/TGL

**Tielaitoksen selvityksiä
47/1993**

**Matti Huhtala, Timo Kurki, Reijo Orama, Jari Pihlajamäki,
Antti Ruotoistenmäki**

**Väsymissuorat tierakenteen
mitoitusta varten**

**Tielaitos
Geokeskus
VTT/TGL**

Helsinki 1993

ISSN 0788-3722
ISBN 951-47-7689-5
TIEL 3200172
Painatuskeskus Oy
Helsinki 1993

Julkaisua myy:
Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,
painotuotemyynti
Telefax (90) 1487 2652

Tielaitos
Opastinsilta 12 A
PL 33
00521 HELSINKI
Puh. vaihde (90) 148 721

HUHTALA Matti, KURKI Timo, ORAMA Reijo, PIHLAJAMÄKI Jari, RUOTOISTENMÄKI Antti:
Väsymissuorat tierakenteen mitoitusta varten.

Helsinki 1993, Tielaitos, Geokeskus. Tielaitoksen selvityksiä 47/1993, 48 s. + liitt., ISBN 951-47-7689-5, ISSN 0788-3722, TIEL 3200172

Avainsanat tien suunnittelu, kunnossapito, vaurioituminen, väsyminen, päällysteet, pohjamaa, kuormitus, muodonmuutokset, pudotuspainolaite

Tiivistelmä

Tutkimuksen tavoitteena oli saada aikaan analyttiseen mitoitusmenetelmään tarvittavat väsymissuorat tierakenteen mitoitusta varten Suomen olosuhteisiin. Väsymissuoraan tarvitaan kriittinen muodonmuutos ja sitä vastaava sallittujen kuormitusten määrä. Kriittisinä muodonmuutoksina käytetään yleensä päällysteen alapinnan venymää ja pohjamaan yläpinnan pystysuoraa puristumaa.

Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskevaa tutkimusta varten perustettiin vuonna 1979 ns. havaintotieverkosto. Tässä tutkimuksessa käytetty lähtöaineisto on kerätty 20 asfalttipäällysteiseltä tieltä. Vauriot on havaittu lähes vuosittain. Vuosina 1991 ja 1992 tehtiin kantavuus- ja kerrospaksuusmittaukset.

Lähtötietoina käytettiin havaintotieverkostosta saatua aineistoa tien rakenteesta, liikennemääristä ja vaurioitumisesta. Muodostettujen vaurioitumismallien avulla määritettiin tiettyihin vaurioasteisiin kertyneet kuormituskertaluvut. Pudotuspainomittauksista laskettiin Modulus-takaisinlaskentaohjelmalla rakennekerrosten moduulit käyttäen koekuopista havaittuja rakennekerrospaksuuksia ja näiden avulla laskettiin kriittiset muodonmuutokset Bisar-monikerrosohjelmalla.

Eri vaurioasteita vastaavat väsymissuorat muodostettiin tämän jälkeen päällysteelle ja pohjamaalle esittämällä kriittisen muodonmuutoksen regressioyhtälö sallittujen kuormitusten funktiona. Saatuja väsymissuoria verrattiin muualla käytettyihin. Lisäksi tarkasteltiin, mitä vaikuttaa tuloksiin, jos laskelmat tehdään tarkemmin jakamalla vuosi eri kausiin ja käyttämällä näille ominaisia arvoja laskelmissa.

Abstract

The objective of this study was to develop fatigue curves needed for analytical pavement design procedure in Finnish conditions. Critical strain and the corresponding maximum allowable number of load repetitions are needed in order to determine a fatigue curve. Critical strains are the tensile strain in the bottom of bituminous layer and the compressive strain on the top of the subgrade.

Monitoring of 3.0 km long observation roads was started in 1979. Data used in this study is derived from 20 asphalt surfaced roads. Distress survey has been made almost yearly. During 1991 and 1992 FWD measurements were carried out, along with the excavation of test pits.

Input for fatigue curves was derived from traffic, distress, layer thickness, and deflection data from observation roads. Distress models were used to determine number of load repetitions at different distress levels. Layer moduli were backcalculated with Modulus-program using layer thicknesses measured from test pits. Critical strains were calculated with a linear-elastic multi-layer program (BISAR) using backcalculated layer moduli as input.

Regression curves of critical strain vs. maximum allowable number of load repetitions were formed for bituminous layer and subgrade. Recommended design curves at distress levels of 5, 10, 20, 40, and 70 $\text{m}^2/100 \text{ m}$ are presented in figure 19 for bituminous layer and in figure 12 for subgrade. Obtained curves were compared to results from other research (figure 15 for bituminous layer and figure 17 for subgrade).

In addition, the year was divided into five periods and seasonal values for parameters were assigned using four pavement sections as an example. It was found that during spring thaw period, one heavy vehicle causes same distress to subgrade as seven similar vehicles in yearly average conditions. Further it was found that traffic during winter season has practically no effect to fatigue distress. Other effects of wintertime were not considered.

Alkusanat

Tiehallitus teetti 1970-luvun lopulla VTT:n tie- geo- ja liikennetekniikan laboratoriolle tutkimuksen "Palojärven - Olkkalan koetien päällysrakenteen teoreettiset laskelmat" /1/. Aikanaan mittava koetie loi edellytykset verrata erilaisia rakenteita sekä rationaalisen mitoitusmenetelmän että vaurioseurannan perusteella.

Teoreettisten tutkimusten jatkamiseksi VTT teki seitsemänosaisen tutkimussuunnitelman (30.9.1985) /2-6/. Sarjasta on tehty viisi ensimmäistä tutkimusta, Tierakenteessa mitattujen ja teoreettisesti laskettujen rasitusten vertailu /2/, Tierakenteen mitoitusmenetelmiin sisältyvien väsymissuorien määrittäminen /3/, Kuorma-autoakselistojen vertailu /4/, Tierakenteen kantavuuden herkkyyksianalyysi /5/ ja Tierakenteen teoreettiset laskelmat, Odemarkin menetelmän tarkastelu /6/.

Vuonna 1986 väsymissuorat määritettiin kahdella tavalla, normeista takaisinpäin ja havaintotietulosten perusteella. Tuolloin havaintoteissa oli vain kuusi kohdetta, joissa vaurioaste oli riittävä kyseiseen tarkasteluun ja tutkimus olikin täten esitutkimuksen luonteinen.

Rohkaisevien tulosten perusteella analyysi päätettiin tehdä vuonna 1992 tarkemmin, kun havaintoja oli kertynyt lisää kuuden vuoden aikana. Tähän tutkimukseen voitiin käyttää 20 havaintokoetien tuloksia.

VTT:n tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio on tehnyt tämän tutkimuksen Tielaitoksen tilaamana ja kustantamana. Tutkimusta on valvonut Tielaitoksen geokeskuksesta ylitarkastaja Reijo Orama. VTT:ssa tutkimuksesta on vastannut tekn.lis. Matti Huhtala, jonka työryhmään ovat kuuluneet dipl.ins. Timo Kurki, dipl.ins. Jari Pihlajamäki ja tekn.yo Antti Ruotoistenmäki.

Sisältö

1	JOHDANTO	7
2	TUTKIMUSMENETELMÄ	9
3	TEHDYT MITTAUKSET JA HAVAINNOT	10
3.1	Vaurioinventointi	10
3.2	Rakennekerrosten ominaisuuksien selvittäminen	11
3.3	Kantavuudenmittaukset	12
4	KUORMITUSKERTALUVUN MÄÄRITYS	13
5	KRIITTISTEN MUODONMUUTOSTEN MÄÄRITYS	16
5.1	Takaisinlaskennan periaate	16
5.2	Taipumanmittaustulosten käsittely takaisin-	
	laskentaohjelmalla	18
5.3	Kriittisten muodonmuutosten laskeminen	21
6	VÄSYMISSUORIEN MÄÄRITTÄMINEN	23
6.1	Yleistä	23
6.2	Asfalttibetonin väsymissuora	25
6.3	Pohjamaan väsymissuora	26
6.4	Vuoden jaksotus	28
7	TULOSTEN TARKASTELU	34
7.1	Lähtötiedot	34
7.2	Päällysteen väsymissuora	35
7.3	Pohjamaan väsymissuora	37
8	SUOSITUKSET	39
9	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	42
10	KIRJALLISUUSLUETTELO	45
11	LIITTEET	48

1 JOHDANTO

Tien rakenteen mitoitus perustuu empiirisiin, semiempiirisiin tai analyttisiin menetelmiin. Suomessa käytettyä Raksu-menetelmää voidaan pitää kehittyneenä semiempiirisenä menetelmänä, jossa voidaan ottaa tietyin rajoituksin huomioon esim. materiaalien vaihtelut. Analyttisessä menetelmässä lasketaan pyöräkuorman aiheuttamat jännitykset ja muodonmuutokset yleensä kimmoteoriaan perustuen ns. kerrosohjelmilla.

Lähtöarvot, kimmomoduulit ja Poissonin luvut voidaan määrittää laboratoriossa tietyin rajoituksin. Ne vaihtelevat kuitenkin suuresti mm. lämpötilan ja kosteuden vaikutuksesta, joten pelkästään laboratoriotulosten perusteella ei voida luotettavasti laskea jännityksiä ja muodonmuutoksia.

Tierakenteen rikkoontuminen perustuu väsymiseen, toisin sanoen toistuvien kuormitusten aiheuttamaan rakenteen rikkoontumiseen. Yksittäisestä kuormituksesta aiheutuva vetojännitys on pienempi kuin materiaalin vetolujuus, mutta useat peräkkäiset kuormitukset aiheuttavat rakenteen rikkoontumisen. Mitä suurempi kuormituksen aiheuttama muodonmuutos rakenteessa on, sitä vähemmän toistuvia kuormituksia se kestää. Väsymisilmiö esitetään yleisesti ns. väsymissuorina, jotka kuvaavat muodonmuutosta sallittujen kuormitusten funktiona täyslogaritmiasteikolla.

Väsyminen voidaan mitata laboratoriossa. Tuloksia ei voida kuitenkaan suoraan käyttää mitoitukseen, sillä kuormitusten väliset tauot, autojen sivusijaintijakautuma, lämpötilajakautumat jne. vaikuttavat tuloksiin.

Edellä esitettyjen syiden takia analyttinen menetelmä on kalibroitava. Väsymissuorien on edustettava koko vuoden tarpeita ja materiaaleille tulee käyttää vastaavalla tavalla määritettyjä painotettuja kimmomoduulien arvoja. Siten tierakenteen analyttista mitoitusta varten tarvitaan kunkin maan olosuhteisiin sovelletut ja kalibroidut väsymissuorat sekä näiden yhteys laboratoriomäärittäykseen (ns. shift factor). Väsymissuorat voidaan määrittää koeteiltä tai havaintotieverkoilta saaduista tuloksista.

Asfaltin väsymistä on tutkittu laboratoriokokein VTT:ssa ASTO:n TR4/2:ssa /7/. Laboratoriokokein määritettävää asfaltin väsymistä on selvittänyt myös PTL:n jaosto 33:n työryhmä, joka on saanut raporttinsa valmiiksi keväällä 1992 /8/. Työryhmä esittää jatkotyönä tämän tutkimuksen kaltaista yhteistyötä.

Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskevaa tutkimusta varten perustettiin vuonna 1979 ns. havaintotieverkosto. Verkostoon valittiin asfalttibetoni-, öljysora- ja sorateita kuudesta TIEL:n piiristä yhteensä 58 kappaletta. Havaintokoeteihin

kuuluneiden sorateiden seuranta lopetettiin vuonna 1983 ja siitä alkaen tutkimuksessa on ollut pelkästään asfalttibetoni- ja öljysorateita. Havaintoteitä on tällä hetkellä seurannassa yhteensä 45 kpl, joista AB-teitä on 29 kpl ja ÖS-teitä 16 kpl.

Havaintotieverkostolla tehtiin vaurioinventointi jokaisella tiellä vuosina 1979 - 1983. Tämän jälkeen pidettiin vuosina 1984 ja 1985 ns. välivuolia, jolloin inventoitiin ainoastaan sellaisten päällystettyjen havaintoteiden kunto, joille tehtiin kyseisinä vuosina parantamistoimenpide. Vuosina 1986 - 1992 havaintoteillä tehtiin vaurioinventointi.

Vuosina 1991 - 1992 havaintoteillä tehtiin vaurioinventoinnin lisäksi kanta-vuudenmittaukset ja selvitettiin rakennekerrosten paksuudet. Näiden tietojen perusteella pyrittiin kehittämään tien vaurioitumiselle ennustemallia. Havaintoteistä on julkaistu vuosina 1979 - 1992 kahdeksan raporttia /9 - 16/.

Suomessa on myöhemmin perustettu ns. PMS-havaintotieverkosto ja SHRP:n LTPP-havaintotieverkosto, johon liittyy kohteita myös muista Pohjoismaista.

Ruotsissa on tehty myöhemmin vastaavanlainen havaintotieverkosto. Molempien aineistot voitaneen yhdistää tai ainakin samoilla perusoletuksien valinnoilla tehdä tulokset vertailukelpoisiksi.

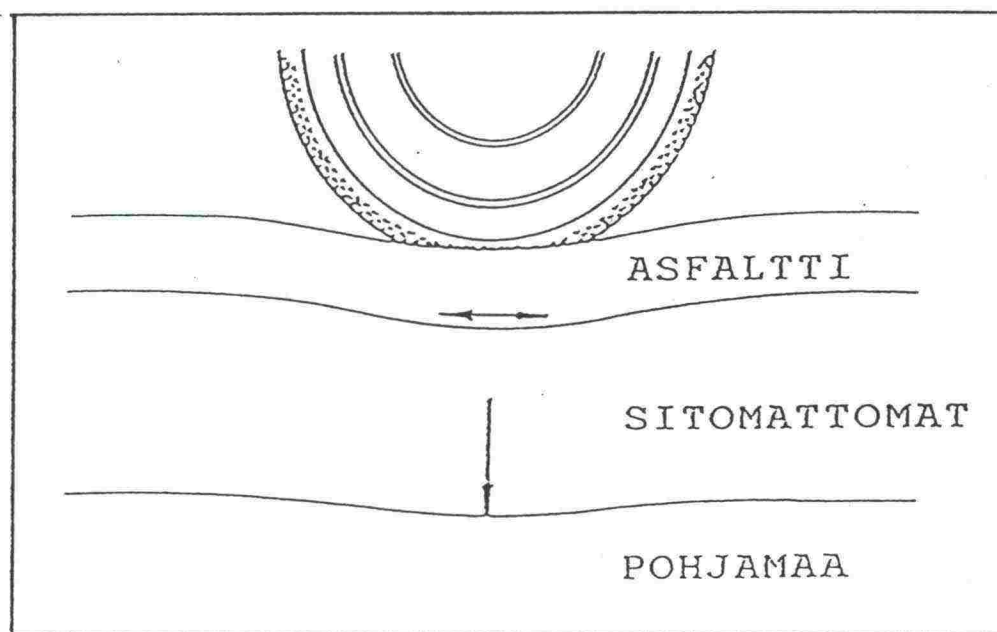
Luotettavinta tietoa väsymissuorien määrittämiseksi saadaan luonnollisesti olemassa olevan tiestön vaurioitumista seuraamalla. Yli kymmenen vuoden ajalta saadut havainnot luovat hyvän pohjan laskelmille.

2 TUTKIMUSMENETELMÄ

Tutkimuksen tavoitteena oli saada aikaan väsymissuorat tierakenteen analyttistä mitoitusta varten Suomen olosuhteisiin. Väsymissuoraan tarvitaan kriittinen muodonmuutos ja sitä vastaava sallittujen kuormitusten määrä. Lähtötietoina käytettiin havaintotieverkostosta saatua aineistoa.

Vaurioinventoinnista saatiin vauriosumman avulla selville tien kunnon kehittyminen ajan funktiona. Kutakin vaurioastetta vastaava kuormituskertaluku saatiin määritettyä tierekisterin liikennemäärätiedoista viimeisessä havaintotieraportissa /16/ esitetyn vaurioitumisnopeuskertoimen avulla.

Kriittisinä muodonmuutoksina käsiteltiin päällysteen alapinnan vaakasuoraa venymää ja pohjamaan pinnan pystysuoraa puristumaa.



Kuva 1: Kriittiset muodonmuutokset.

Kriittiset muodonmuutokset määritettiin pudotuspainomittausten ja rakennekerrospaksuuksien perusteella. Pudotuspainomittauksista laskettiin Modulus-ohjelmalla rakennekerrosten moduulit ja näiden avulla laskettiin kriittiset muodonmuutokset Bisar-monikerrosohjelmalla.

Eri vaurioasteita vastaavat väsymissuorat muodostettiin tämän jälkeen regressiosuorana päällysteelle ja pohjamaalle esittämällä kriittiset muodonmuutokset sallittujen kuormitusten funktiona täyslogaritmiasteikolla.

3 TEHDYT MITTAUKSET JA HAVAINNOT

3.1 Vaurioinventointi

Tässä tutkimuksessa käytettiin päällysteen vaurioiden määrittämisessä havaintotie-tutkimuksista saatua valmista aineistoa /16/. Havaintoteiden päällysteessä esiintyvien vaurioiden määrät on inventoitu 100 metrin välein yksityiskohtaisesti liitteen 1 mukaisen lomakkeen avulla.

Inventoidut vauriotyypit olivat:

- poikkihalkeamat
- pituushalkeamat
- vinohalkeamat
- routahalkeamat
- paikkaukset
- reiät, purkautumat
- muut vauriot

Poikkihalkeamat arvioitiin kolmella eri tavalla riippuen siitä, onko kysymyksessä ajoradan vai ajokaistan poikki ulottuvia halkeamia.

Pituushalkeamista tarkastettiin niiden sijainti kaistalla (keskiosassa tai keskisaumassa).

Lisäksi halkeamavaurioista arvioitiin halkeaman leveyden perusteella vaurioitumisaste. Niitä oli kolme eri luokkaa pienen vaurioasteen tarkoittaessa mikrohalkeamia, keskisuuren alle 10 mm:n halkeamia ja suuren yli 10 mm:n halkeamia. Vaurioiden sijainti määritettiin kuuluvaksi ajouraan, pientareelle tai ajourien väliin jäävälle alueelle.

Teiden vaurioitumisastetta kuvataan vauriosummamuuttujan avulla. Vauriosumman yksikkönä on $m^2/100$ m, ja se saadaan laskemalla tiellä esiintyneet painotetut vauriomäärät yhteen ja redusoimalla saatu tulos ajoradan vakioleveydelle, joksi on valittu 7,0 m. Vaurioitunut pinta-ala lasketaan vaurion pituuden ja keskimääräisen leveyden tulona. Viivahalkeaman leveydeksi on laskelmissa valittu 1 m. Erilaisten vaurioiden suhteellinen haitta tierakenteen kestoajan kannalta on otettu huomioon painotuskertomella, jonka suuruudeksi on valittu 0,1 - 2,0 seuraavasti:

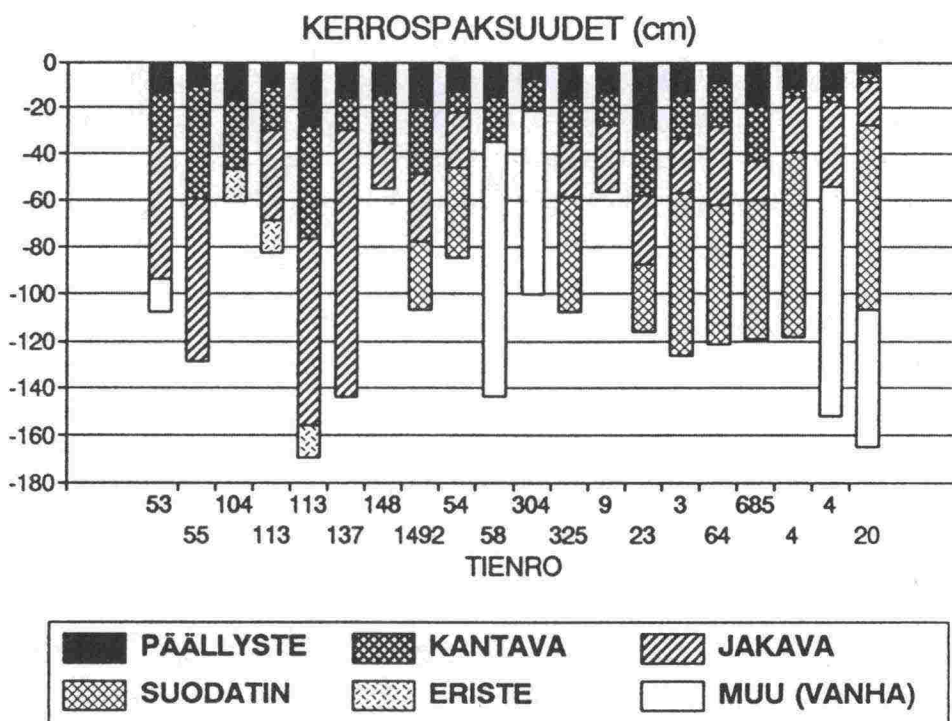
Vauriotyyppi Painotuskerroin

Poikkihalkeama	0,1
Pituushalkeama	0,5
Keskisaumahalkeama	0,1
Muut (vinot ym.) halkeamat	0,5
Verkkohalkeamat	1,0
Reiät ja purkautumat	2,0
Paikkaus	1,0

Kunkin havaintotien keskimääräinen vauriosumma laskettiin jakamalla tiellä esiintyvien vaurioiden yhteismäärän perusteella laskettu vauriosumma tien pituudella sataa metriä kohden.

3.2 Rakennekerrosten ominaisuuksien selvittäminen

Koetiet kaivettiin auki tien reunasta tai reunimmaisen ajouran kohdalta. Tällöin mitattiin rakennekerrosten paksuudet ja otettiin näytteet kerroksittain. Lisäksi tieltä porattiin päällystenäytteet. Kuvassa 2 on esitetty graafisesti tiedot kerrospaksuuksista.



Kuva 2: Havaintoteiden kerrospaksuudet.

3.3 Kantavuudenmittaukset

Tien rakenteellisia ja materiaaliominaisuuksia sekä sen kuntoa kuvaa siihen kohdistuvasta kuormasta aiheutava taipuma. Taipuman mittaamiseen käytettiin pudotuspainolaitetta, joka on ainetta rikkomaton koestusmenetelmä. Mittaukset tehtiin Dynatest 8000-merkkisellä laitteella, joka mittaa päällysteen taipuman seitsemään pisteeseen sijoitetuilla geofoneilla tietyillä etäisyyksillä kuormituslevystä. Taipumasuppilon muodon perusteella arvioidaan tien rakennekerrosten ominaisuuksia.

Koska mittaukset tehtiin samaan aikaan SHRP:n LTPP-mittausten kanssa, käytettiin samoja antureiden etäisyyksiä kuormituslevystä. Etäisyydet olivat 0, 200, 300, 450, 600, 900 ja 1500 mm kuormituslevyn keskeltä. Mittauksissa käytettiin yhtä pudotuskorkeutta ($h_3 = 220$ mm), jota vastaava levyyn kohdistuva voima on noin 50 kN, eli vastaa kuorma-autojen 10 tonnin akselipainoa (5 tonnin pyöräpaino). Mittauksessa tehtiin kuusi pudotusta, joista kolmen viimeisen pudotuksen maksimitaipumat tallennettiin kunkin anturin kohdalta. Ensimmäiset kolme pudotusta tehtiin anturien asettamiseksi kohdalleen tienpintaa vasten. Käytetty menetelmä on yhteismitallinen SHRP:ssä käytetyn menetelmän kanssa.

Havaintoteiden pituus on 2 - 3 km. Mittaukset tehtiin oikeanpuoleisen pyöräuran kohdalta 50 metrin välein alkaen 25 m havaintotien alusta, seuraava 75 m, 125 m, jne. Lisäksi koetieltä valittiin kaksi 100 m pituista homogeenista osuutta, jolla mittaukset tehtiin 10 m välein sekä samojen 100 m osuuden keskeltä (50 m) SHRP-mittaus (4 pudotuskorkeutta) yhdessä pisteessä.

Tielaitoksen tierekisteriä varten tehtävät kantavuuden mittaukset tehdään Kuab-merkkisellä pudotuspainolaitteella, jonka kuormitusaika on kaksinkertainen Dynatestin laitteeseen verrattuna. Antureita on kuusi, joiden etäisyydet kuormituslevyn keskeltä ovat 0, 200, 450, 600, 900 ja 1200 mm. Kuormituksen tiehen aiheuttama voima on noin 50 kN. Mittauspisteessä tehdään kaksi pudotusta, joista jälkimmäinen tallennetaan. Tieosalta tehdään kymmenen mittausta.

Pudotuspainolaitteessa on infrapunalämpömittari, joka mittaa asfaltin pintalämpötilan, mikä ei kuitenkaan anna tietoa koko asfalttikerroksen lämpötilajakaumasta. Tämän vuoksi havaintotieltä valittiin sen lämpötilaoloja (aurionpaiste/varjo) edustava piste (tarvittaessa kaksi), johon porattiin yksi reikä noin asfalttikerroksen puoliväliin, josta asfaltin lämpötila mitattiin. Reikään kaadettiin parin sentin kerros mineraaliöljyä, jotta saatiin mitatuksi lämpötila juuri tietyllä syvyydellä.

4 KUORMITUSKERTALUVUN MÄÄRITYS

Kuormituskertaluvun määrittämisessä ensimmäinen asia on määrittää se vauriomäärä, milloin tien eliniän arvioidaan loppuneen. Laboratoriokokeissa se on koekappaleen murtuma ja sen yleisin määrittelytapa on jäykkyysmoduulin pientyminen 50 % lähtöarvostaan. Toinen määrittelytapa on koekappaleen alapintaan syntynyt murtuma, esim. murtumaa mittaavan venymäliuskan katkeaminen.

Tiellä ei voi tietenkään mitata asfaltin alapinnan murtumaa, vaan se havaitaan vasta halkeaman läpäistyä päällysteen. Tien käyttökelpoisuuden kannalta yksittäisillä murtumilla ei ole merkitystä. Korjaustoimenpiteet tehdään vasta kun vaurioiden määrä (vauriosumma) on ylittänyt kullekin tieluokalle määrätyn raja-arvon.

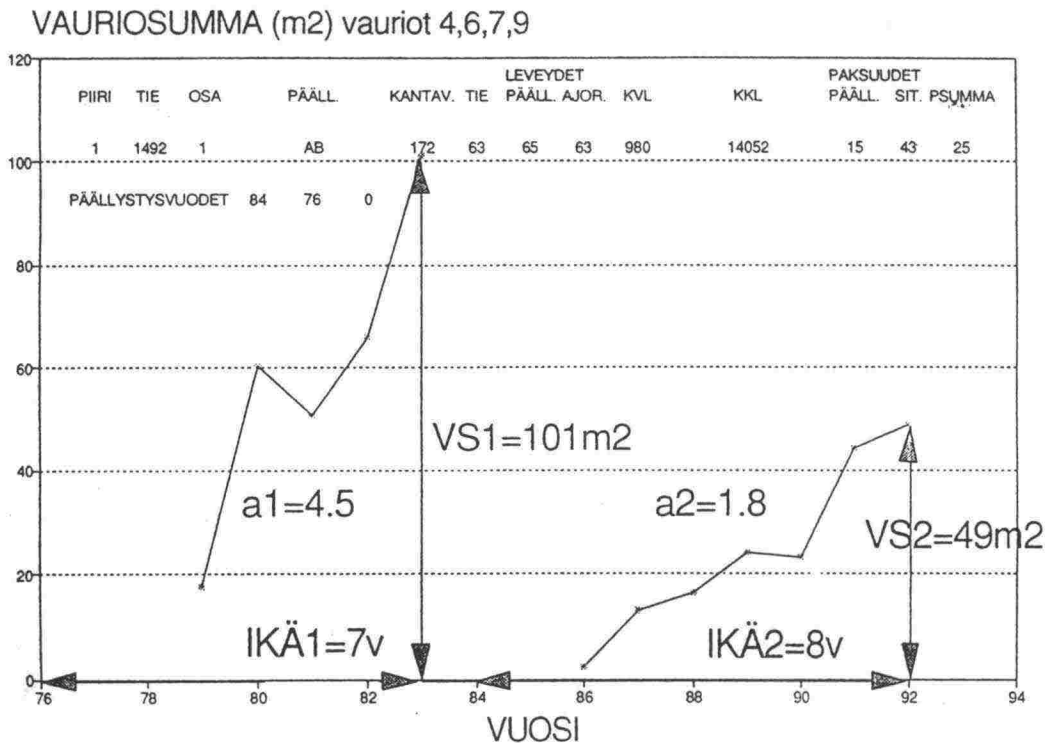
Suomessa vilkkaasti liikennöityjen teiden uusimiskriteeri on yleensä kulumisesta ja deformaatiosta aiheutuneet urat. Koska rakenteellisia vaurioita ei useimmiten ehdi syntyä tarpeeksi, rakenteellisista vaurioista aiheutuva elinikä pitää arvioida toisella tavalla. Tässä tutkimuksessa päädyttiin käyttämään havaintotie-tutkimuksissa kehitettyä menetelmää. Tien historiatiedoista tutkitaan ennen päällystämistä oleva vauriomäärä (tai viimeisin vaurioinventoinnin mukainen vauriomäärä) ja jaetaan se päällysteen iällä korotettuna potenssiin 1,6 (kuva 3), jolloin saadaan tien päällysteelle vaurioitumisnopeuskerroin (a) /16/.

$$a = VS_{\text{havaittu}} / (IK\ddot{A}_{\text{havaittu}})^{1,6}$$

$$(IK\ddot{A}_{\text{mitoitus}})^{1,6} = VS_{\text{mitoitus}} / a$$

$$IK\ddot{A}_{\text{mitoitus}} = (VS_{\text{mitoitus}} / a)^{1/1,6}$$

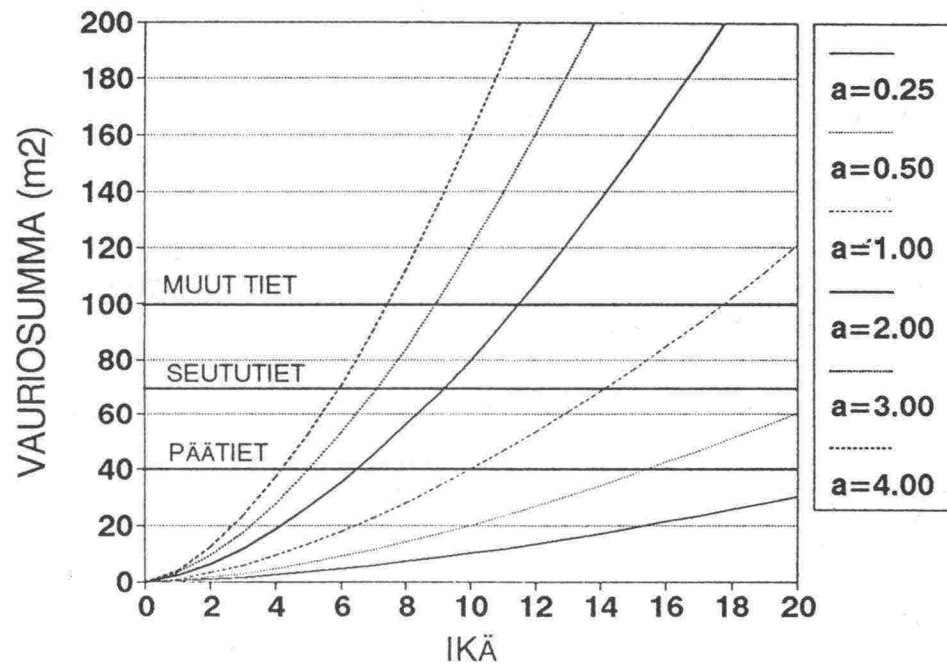
$$KKL_{\text{mitoitus}} = IK\ddot{A}_{\text{mitoitus}} \times KKL_{\text{vuosittainen}}$$



Kuva 3: Tien vaurioitumisnopeuden määrittäminen /16/.

Tässä tutkimuksessa ei ole käytetty vauriosumman laskemiseen kaikkia vaurioita, vaan ainoastaan niitä, jotka ovat työryhmän käsityksen mukaan luonteeltaan väsymisvaurioita. Niitä ovat verkkohalkeamat ja paikkaus (suurin osa paikkauksesta on tehty verkkohalkeamien takia), pitkittäishalkeamat (ei keskisaumahalkeamat) ja osa vinoista halkeamista. Muiden vaurioiden (poikkihalkeamat, reiät, purkaumat) osuus vauriosummassa onkin yleensä pieni, koska niiden kertoimet ja esiintymismäärät ovat pieniä. Havaintotiekoh- teiden erityyppiset vauriot ja vauriosummat on esitetty liitteessä 2/1 - 13.

Kuvassa 4 on esitetty eri kulmakertoimilla (a) vauriokehitys ja Päälysteiden kunnostuskriteerit julkaisun /17/ mukaiset kunnostustoimenpiteiden raja-arvot. Kun tiedossa on a ja tierekisteristä vuosittainen kuormituskertaluku, saadaan laskettua tien päällysteille iät ja vastaavat kuormituskertaluvut halutulla vauriomäärällä. Kuormituskertaluvut ovat jäljempänä laskettu vauriosummille 5, 10, 20, 40 ja 70 m².



Kuva 4: Vauriosumman riippuvuus vaurioitumisnopeudesta ja eri luokan teiden päällysteen kunnostuskriteerit /17/.

5 KRIITTISTEN MUODONMUUTOSTEN MÄÄRITYS

5.1 Takaisinlaskennan periaate

Pyöräkuormitus aiheuttaa tien pintaan taipumasuppilon. Pudotuspainolaitteella simuloidaan ylittävän auton pyörän tierakenteeseen aiheuttamaa rasitusta. Takaisinlaskentaohjelmat laskevat pudotuspainolaitteella mitatun taipumasuppilon perusteella tien rakennekerrosten muodonmuutosmoduulit.

Pudotuspainolaitteen mittaustulokset käsiteltiin Modulus-takaisinlaskentaohjelmalla /19/. Ohjelma soveltaa lineaarista monikerrosteoriaa, jossa materiaalit oletetaan lineaarisesti kimmoisiksi. Rakenteen oletetaan muodostuvan kerroksista, jotka jatkuvat vaakasuunnassa äärettömyyteen ja joiden kimmomoduuli E on vakio. Viimeisen kerroksen (pohjamaan tai kovan pohjan) oletetaan jatkuvan äärettömän syvälle.

Ohjelma lukee taipumamittaustiedoston levyltä. Käyttäjä antaa valikossa syöttötietoina mm. kerrospaksuudet, ylä- ja alarajat kerrosmoduulien arvoille ja lähtöarvon pohjamaan moduulille, Poissonin luvun arvon kullekin kerrokselle sekä kuormituslevyn säteen ja taipumamittaustietojen etäisyydet /18/.

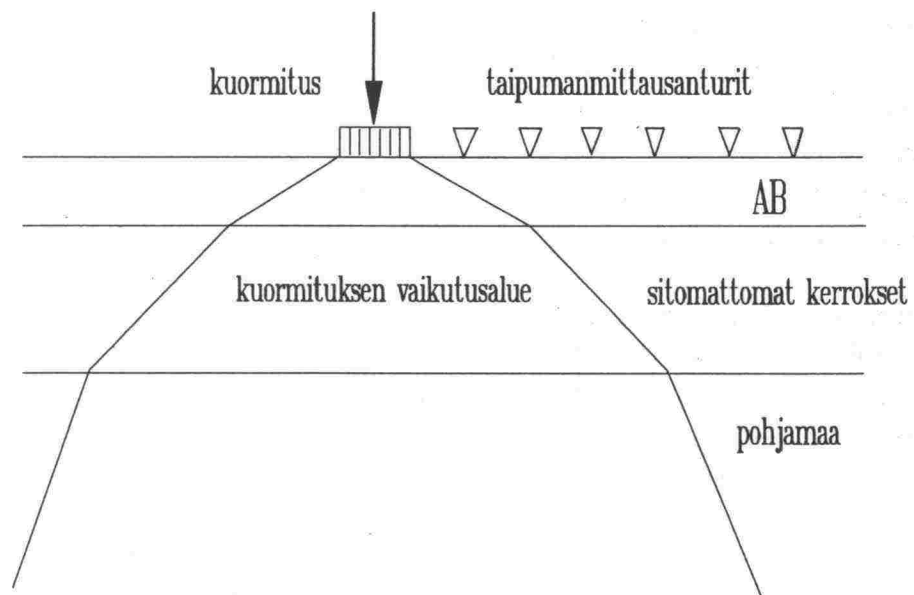
Ohjelma tulostaa materiaalimoduulit, mitatut ja lasketut taipumat sekä näiden välisen virheen suuruuden, tilastotiedot koeosuudelta (keskiarvo, otoskeskihajonta, variaatiokerroin), jne. tiedostoihin, joista ne voidaan viedä edelleen esim. taulukkolaskentaohjelmalla käsiteltäväksi. Ohjelmalla voidaan myös tulostaa tiedot paperille.

Ohjelman toiminta on kaksiosainen: Ensin lasketaan lineaaris-elastisella monikerrosohjelmalla (WES5) taipumasuppilotietokanta. Lähtötietoina monikerrosohjelma käyttää käyttäjän syöttämistä ylä- ja alarajoista laskettuja suhteellisia arvoja kerrosmoduulien arvoille. Toisessa vaiheessa kutakin mitattua taipumasuppiloa vuorollaan verrataan laskettuun taipumasuppilotietokantaan. Interpoloimalla etsitään kerrosmoduulien yhdistelmä, jolla saavutetaan mitattujen ja laskettujen taipumien välisen suhteellisen erotuksen neliön minimi /19/.

Todellisissa tierakenteissa pohjamaa voi ulottua laskennan kannalta "äärettömän" syvälle samanlaisena (moduuli vakio) tai jollakin syvyydellä voi sijaita jäykkä kerros (kallio, moreeni, jne.). Pohjamaan moduuli voi myös muuttua syvyyden kasvaessa maaperässä vallitsevan jännitystilän ja -tason muuttumisen seurauksena (jännitysriippuva materiaali). Yleensä materiaalit ovat jännitysriippuvia ja kimmo-plastisia eivätkä lineaarisesti kimmoisia, kuten laskennassa oletetaan. Koheesiomaalajeilla rakennekerrosmoduuli pienenee

jännitystason kasvaessa. Kitkamaalajeilla moduuliarvo yleensä kasvaa jännitystason kasvaessa.

Jännitykset jakautuvat tierakenteessa kuvassa 5 esitetyllä tavalla. Mitatut tienpinnan taipumat aiheutuvat kuormituksen vaikutusalueella tapahtuvista muodonmuutoksista siten, että taipuma tietyllä etäisyydellä kuormituslevystä aiheutuu vastaavalla syvyydellä rakenteessa tapahtuvasta muodonmuutoksesta. Siten, mikäli kauimpana kuormituslevystä mitatut taipumat ovat hyvin pieniä, lähellä pintaa sijaitsee todennäköisesti jäykkä kerros tai pohjamaan moduuli kasvaa voimakkaasti syvyyden kasvaessa. Jos taipumat ovat keskinkertaisia tai suuria, on pohjamaa heikkoa. Ohjelma laskee mitattujen taipumasuppiloiden perusteella syvyyden kovaan pohjaan. Laskennallisesti kova pohja otetaan huomioon antamalla sille hyvin suuri muodonmuutosmoduulin arvo /20/.



Kuva 5: Pudotuspainolaitteen kuormituksen jakautuminen tierakenteessa.

Jos pohjamaassa ei millään syvyydellä ole jäykkää kerrosta, laskee ohjelma kuitenkin näennäisen syvyyden kovaan pohjaan. Tämä tarkoittaa sitä, että kuviteltu rakenne (pohjamaan moduuli vakio sitomattomien kerrosten alapinnasta kovaan pohjaan) vastaa toiminnaltaan todellista tilannetta, jossa pohjamaan moduuli kasvaa syvyyden mukana. Jos pohjamaa on mitattujen taipumien perusteella homogeenistä, ohjelma olettaa sen äärettömän syväksi. Käyttäjä voi myös itse syöttää syvyyden sitomattoman kerroksen alapinnasta kovaan pohjaan tai määrätä sen äärettömäksi /18,20/.

Jännitys pohjamaan pinnalla on suurimmillaan suoraan kuormituslevyn alapuolella ja pienenee kauempana kuormituslevystä (kuva 5). Pohjamaan moduuli on yleensä jännitysriippuvainen. Pohjamaan jäykkyys vaikuttaa koko taipumasuppilon muotoon. Siksi pohjamaan moduulin määrittämiseen on myös käytettävä koko taipumasuppiloa antaen suurin painoarvo lähinnä kuormituslevyä mitatuille taipumille /20/.

Takaisinlaskennassa rakennekerrosmoduulit etsitään minimoimalla laskettujen ja mitattujen taipumien välisen prosentuaalisen erotuksen neliö. Kauimmaisten anturien mittaamat taipumat ovat absoluuttisesti pienempiä kuin läheltä kuormituslevyä mitatut taipumat, joten virheprosentti kasvaa helposti suureksi. Jos virhe on suuri ($>2\%$ /anturi), on syytä epäillä laskettujen rakennekerrosmoduulien oikeellisuutta /20,21/.

Kahdessa edellisessä kappaleessa esitetyistä syistä sekä mahdollisten dynaamisten vaikutusten vuoksi /20/ kunkin anturin mittaamalle taipumalle määritetään painokerroin W_i (arvo välillä 0..1), jonka suuruus on normaalisti $W_i = d_i/d_1$, missä d_i on taipuma anturin i kohdalla ja d_1 taipuma kuormituslevyn keskellä. Tällä tavoin määriteltynä painokertoimen arvo on suurimmillaan keskipisteen taipumalle (=1) ja pienenee kuormituslevystä kauemmaksi mentäessä. Käyttäjä voi myös itse määritellä painokertoimet. Jos $W_i = 0$, ko. taipumaa ei huomioida takaisinlaskennassa /20/.

Ohjelma määrittää laskennassa käytettävien anturien määrän siten, että viimeinen mukaan otettava taipuma kuvaa pohjamaan yläpinnan jäykkyyttä /20/. Yläpinta on yleensä pohjamaan heikoin osa, ja tierakenne mitoitetaan siihen kohdistuvalle pystysuoralle puristusjännitykselle. Yleensä meikäläiset tierakenteet ovat niin paksuja, että kaikki anturit huomioidaan takaisinlaskennassa.

5.2 Taipumanmittaustulosten käsittely takaisinlaskentaohjelmalla

Tässä tutkimuksessa käytetyissä havaintotiekohteissa tehtiin pudotuspainomitaukset luvussa 3.3 esitetyllä tavalla. Mittaustuloksista laskettiin Modulus-ohjelmalla rakennekerrosmoduulit seuraavassa esitetyllä tavalla. Laskelmien tulokset on esitetty liitteessä 3. Tässä tutkimuksessa takaisinlaskennassa käytettiin viimeistä kaikkiaan kuudesta pudotuksesta.

Ensin laskettiin koko havaintotieosuus (yleensä 3,0 km). Pohjamaan moduulille määritettiin lähtöarvo kaavoilla, joissa pohjamaan moduuli arvioidaan kauimmaisten anturien mittaaman taipuman perusteella /22/:

$$E_{sg} = -3.65435 + 24.398 \cdot \left(\frac{P}{D_3}\right)$$

$$E_{sg} = 20308 \cdot \frac{P}{D_r \cdot r},$$

missä	E_{sg} on pohjamaan moduuli, MN/m ²
	P kuorma, kN
	D_3 tien pinnan taipuma 914 mm kuormituslevystä, µm
	D_r tien pinnan taipuma etäisyydellä r kuormituslevystä, µm
	r taipumanmittausanturin etäisyys kuormituslevystä, mm

Ensimmäinen kaava on Newcombin WSDOT:n suunnitteluohjetta varten laatima regressioyhtälö kolmikerrosrakenteelle. Se on saatu lineaarisella ohjelmalla simuloitujen taipumasuppiloiden perusteella. Jälkimmäinen yhtälö on Witczakin AASHTO:n suunnitteluohjeessa esittämä regressioyhtälö. Koska takaisinlaskennan antamat pohjamaan moduuliarvot osoittautuivat olevan järjestelmällisesti pienempiä kuin kaavoilla saadut arviot, lähtöarvoja pienennettiin.

Asfalttibetonin ja sitomattomien rakennekerrosten moduulien vaihteluvälit annettiin materiaaleilla tavallisesti esiintyvien vaihteluvälien mukaisina. Vaihtelurajat annettiin yleensä melko väljinä, koska kohteen sisällä samalla materiaaalilla esiintyi melko paljon hajontaa. Poissonin luvun arvona käytettiin $\mu = 0,35$ kaikille kerroksille.

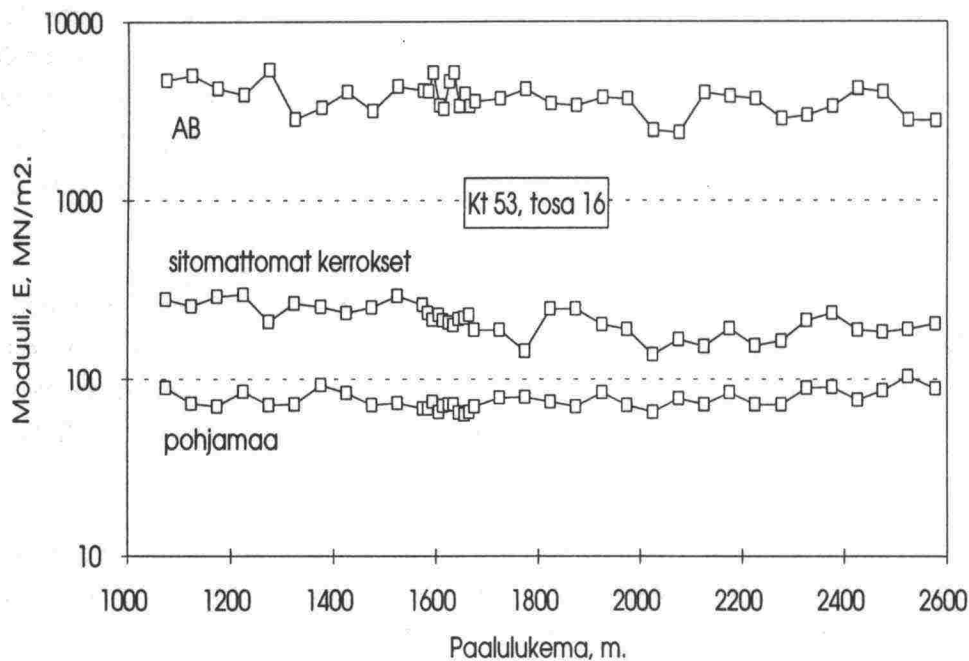
Rakennekerrospaksuuksina käytettiin luvussa 3.2 esitetyllä tavalla tehdyistä koekuopista havaittuja paksuuksia. Käytetty takaisinlaskentaohjelma pystyy käsittelemään enintään nelikerroksisia rakenteita, missä pohjamaa on yksi neljästä kerroksesta. Laskentaa varten ominaisuuksiltaan (tiiviys, moduuli) lähinnä samankaltaisia kerroksia yhdistettiin tarvittaessa yhdeksi kerrokseksi. Useimmiten kantava kerros käsiteltiin omana kerroksenaan ja muut sitomattomat kerrokset yhdistettiin.

Mikäli asfalttikerroksen paksuus on alle puolet kuormituslevyn säteestä (<75 mm), sen moduuliarvo täytyy kiinnittää, sillä ohjelma ei pysty käsittelemään ohuita kerroksia vaan antaa niille selvästi liian korkean moduuliarvon. Moduuliarvo kiinnitetään antamalla ala- ja ylärajaksi sama arvo, joka on arvioitu käytettävissä olevien tietojen ja kokemuksen perusteella (vaurioitumisaste, yms). Sitomattomilla kerroksilla kriittinen paksuus on 100..150 mm.

Ohut kantava kerros yhdistettiin jakavaan kerrokseen, mikäli saadut moduuliarvot olivat epärealistisen korkeita.

Pohjamaan paksuutena ts. kovan pohjan syvyytenä käytettiin ohjelman taipumasuppliloiden perusteella määrittämää todellista tai näennäistä syvyyttä kovaan pohjaan.

Seuraavassa vaiheessa tuloksista laadittiin kuvan 6 mukaiset kuvat, joissa esitetään rakennekerrosmoduulien vaihtelu koeosuudella. Näitä kuvia, vauriotietoja sekä havaintoteistä olevaa videonauhaa apuna käyttäen valittiin ns. homogeeniset osuudet tarkempaa analyysiä varten. Homogeeniset osuudet valittiin siten, että koekuopat ovat homogeenisen osuuden sisällä, jotta voitiin olettaa rakenteen valitulla osuudella olevan sellainen kuin koekuopasta oli havaittu.



Kuva 6: Rakennekerrosten Modulus-ohjelmalla lasketut materiaalimoduulit.

Osuudet pyrittiin myös valitsemaan siten, että moduulit vaihtelevat mahdollisimman vähän osuuden pituudella. Erityisesti pyrittiin pohjamaan homogeenisuuteen. Homogeenisten osuuksien pituus vaihteli välillä 100...900 m, ollen keskimäärin noin 400...500 m (liite 4).

Lyhyiden osuuksien käyttö kestoajan määrittämiseen on perusteltua kahdesta syystä: parametrien (rakennekerrosten paksuus, kimmomoduuli) hajonta on

pienempää kuin pitkillä koeosuuksilla ja havainnot voidaan tehdä periaatteessa tarkemmin. Vaurioinventointi on kuitenkin tehty koeosuuksien pituuden (3,0 km) vuoksi liikkuvasta autosta. Havaituissa vauriomäärissä homogeenisilla osuuksilla esiintyy hajontaa. Lisäksi etäisyysmittauksessa voi esiintyä epätarkkuutta. Näistä syistä rakenteen kuormituskertalukua määritettäessä on käytetty koko koeosuuden (3,0 km) vauriomäärän keskiarvoa.

Rakennekerrosmoduulit määritettiin uudelleen homogeenisille osuuksille. Moduulien lähtöarvoja tarkistettiin tarvittaessa edellisen laskennan antamien tulosten perusteella.

5.3 Kriittisten muodonmuutosten laskeminen

Väsymissuorien määrittämisessä käytetyt venymän arvot laskettiin lineaarisella monikerrosohjelmalla (BISAR) /23/ käyttäen kerrosmoduulien arvoina pudotuspainomittauksista takaisinlaskettuja moduuleja. Moduuliarvoina käytettiin homogeenisen osuuden keskiarvoja. Materiaalihajonnan aiheuttama epävarmuus on otettu huomioon lopullisia suoria määritettäessä luvussa 6 esitetyllä tavalla. Asfalttibetonin muodonmuutosmoduulina käytettiin vertailulämpötilaan +21 °C (+70 °F) korjattua moduuliarvoa. Lämpötilakorjaus tehtiin AASHTO:n ohjeissa esitetyllä tavalla /24/.

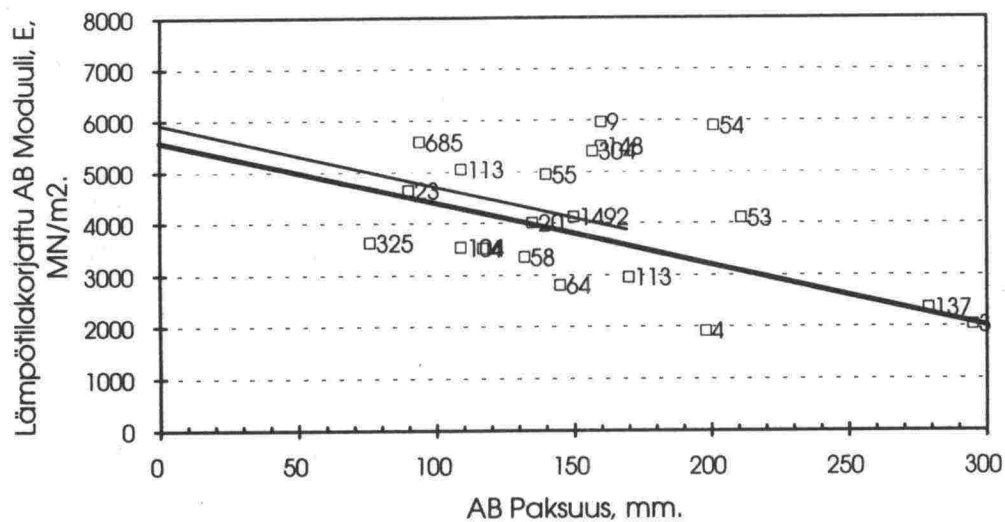
Kerrospaksuuksina käytettiin takaisinlaskennassa käytettyjä kerrospaksuuksia. Pohjamaa oletettiin venymälaskelmissa puoliäärettömäksi. Poissonin luvun arvona käytettiin $\mu = 0,35$ kaikille kerroksille ja kerrosten välille oletettiin täysi kitka.

Kriittisinä muodonmuutoksina laskettiin asfalttikerroksen alapinnan vaakasuora vetomuodonmuutos ja pohjamaan yläpinnan pystysuora puristusmuodonmuutos.

Kullekin kohteelle on määritetty yleensä viimeisintä ja sitä edellistä vauriokehitystä vastaavat venymät ja kuormituskertaluvut. Pudotuspainomittaus on useimmiten tehty viimeisimmän vauriokehityksen aikana, jolloin sitä vastaava päällystepaksuus ja muodonmuutosmoduuli saadaan suoraan takaisinlaskennan tuloksista. Edellistä vauriokehitystä vastaavaa venymää laskettaessa päällyste on oletettu 50 mm nykyistä ohuemmaksi.

Aiempien päällystekerrosten vaurioitumisen seurauksena yhdistetyn asfalttikerroksen moduuli on pienempi kuin uuden vaurioitumattoman päällysteen moduuli. Tämä on otettu huomioon seuraavalla likimääräisellä tavalla: Liitteen 3 taulukon arvoilla on piirretty asfalttikerroksen paksuuslämpötilakorjattu AB moduuli-kuvaaja (kuva 7). Kuvassa näkyvä suora piirret-

tiin ottaen huomioon, että kohteissa 9, 54 ja 148 oli mittausajankohtana uusi tai lähes uusi päällyste. Kunkin pisteen kautta piirrettiin tämän suoran kanssa yhdensuuntainen suora, jolta luettiin kohteittain kutakin päällystepaksuutta vastaava asfaltin moduuli. Esimerkkinä kuvassa on kohteelle 1492 piirretty suora. Sitomattomien kerrosten ja pohjamaan moduulien oletettiin pysyvän samoina päällystyskerrosten määrästä riippumatta, ts. kaikissa tapauksissa käytettiin takaisinlaskettuja arvoja.



Kuva 7: Päällystepaksuuden ja vaurioitumisen vaikutus asfalttikerroksen takaisinlaskettuun moduuliin.

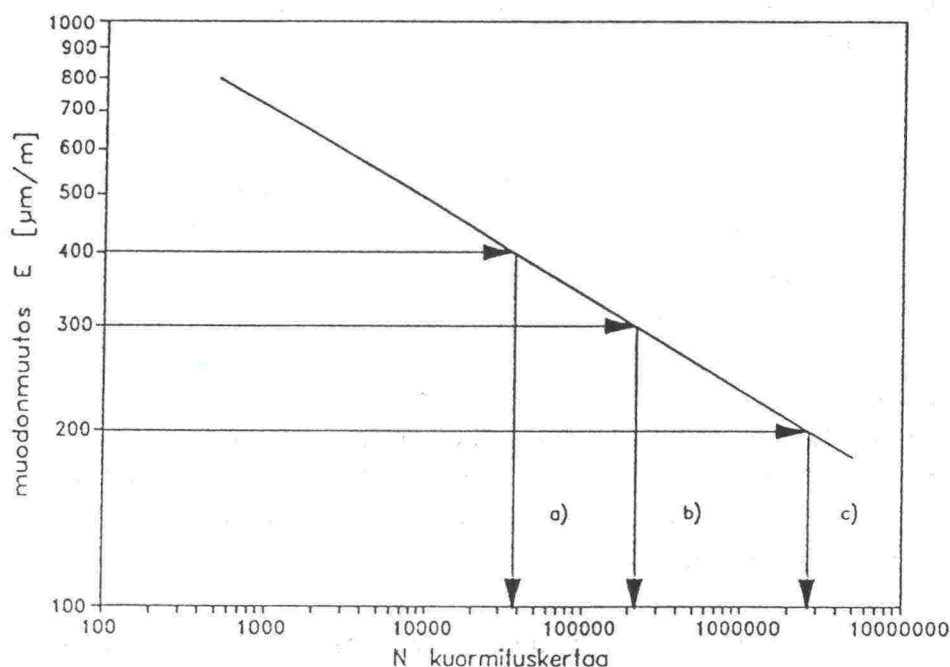
6 VÄSYMISSUORIEN MÄÄRITTÄMINEN

6.1 Yleistä

Tien ja varsinkin päällysteen vaurioituminen on luonteeltaan väsymistä. Rakenne rikkoontuu toistuvien kuormitusten takia, erittäin harvoin yksi ylisuuri kuormitus aiheuttaa rakenteen murtumisen. Mitoitusta varten tarvitaan kuormitusten aiheuttamien tierakenteen muodonmuutosten ja rakenteen kestämiä kuormitusten lukumäärän yhteys. Juuri Suomen vaativiin olosuhteisiin tarvittavien väsymissuorien määrittämiseen luotettavin aineisto on havaintotieverkostolla tehdyt mittaukset ja havainnot.

Väsymissuorat määritetään yleensä laboratoriossa. Koekappaleita kuormitaan niin, että joko kuormittava voima tai kuormituksen aiheuttama muodonmuutos pidetään aina samana. Voimaa ja muodonmuutosta ei voida molempia pitää vakiona, sillä materiaalin ominaisuudet muuttuvat kokeen aikana. Kuormitusta jatketaan, kunnes koekappale katsotaan murtuneeksi ja kuormitusten lukumäärä rekisteröidään. Murtumiskriteereitä on lukuisia. /7/

Kutakin muodonmuutosta vastaa siis tietty kuormituskertaluku. Väsymissuora saadaan yhdistämällä saadut muodonmuutos/kuormitukset-pisteet suoraksi log-log-asteikolla. Kun materiaalille on määritetty väsymissuora, mitä tahansa muodonmuutosta vastaava kuormituskertaluku (tai päinvastoin) voidaan määrittää kuvan 8 mukaisesti.



Kuva 8: Väsymissuoran käytön periaate.

Väsymisilmiö materiaalin ominaisuuksien heikkenemisen kuvaajana on yleisesti käytetty metallien yhteydessä (esim. alumiini, teräs). Asiaa on tutkittu varsinkin lentokoneteollisuudessa erittäin paljon. Samaa ilmiötä on sovellettu tierakenteisiin ja tämä on todettu varsin käyttökelpoiseksi.

Erisuuruiset muodonmuutokset voidaan yhdistää Minerin lakiin perustuvalla kaavalla:

$$\sum n_i / N_i = 1$$

missä n_i = kuormituskertaluku muodonmuutokselle ε_i
 N_i = päällysteen murtumisen aiheuttama kuormituskertaluku muodonmuutokselle ε_i

Tiellä tarkastellaan yhtä tilannetta, jossa kuormituksena on standardiakseli. Meillä käytetään yleensä paripyörin varustettua yksittäistä 10 tonnin akselia. Muut akselit muunnetaan tietyillä kertoimilla standardiakseleiksi ja tällöin saadaan tietynä aikana tielle kertyvä kuormituskertaluku. Standardiakseli aiheuttaa rakenteeseen tietyn muodonmuutoksen. Rakenne on suunniteltava siten, että standardiakselin aiheuttama analyttisesti laskettu muodonmuutos on pienempi kuin väsymiskriteeristä saatava suunnittelukuormituskertalukua vastaava muodonmuutos.

Standardiakseli aiheuttaa vuoden eri aikoina eri suuren muodonmuutoksen rakenteeseen, koska rakenteen ominaisuudet vaihtelevat eri vuodenaikoina. Jos halutaan laskea tarkemmin, vuosi pitää jakaa jaksoihin, esim. neljään vuodenaikaan. Tällöin rakenne särkyä, kun

$$v \cdot \sum n_i / N_i = 1$$

missä n_i = kuormituskertaluvut eri jaksojen muodonmuutoksilla ε_i
 N_i = eri jaksojen särkymisen aiheuttavat kuormituskertaluvut muodonmuutoksilla ε_i
 v = kestoikä vuosina

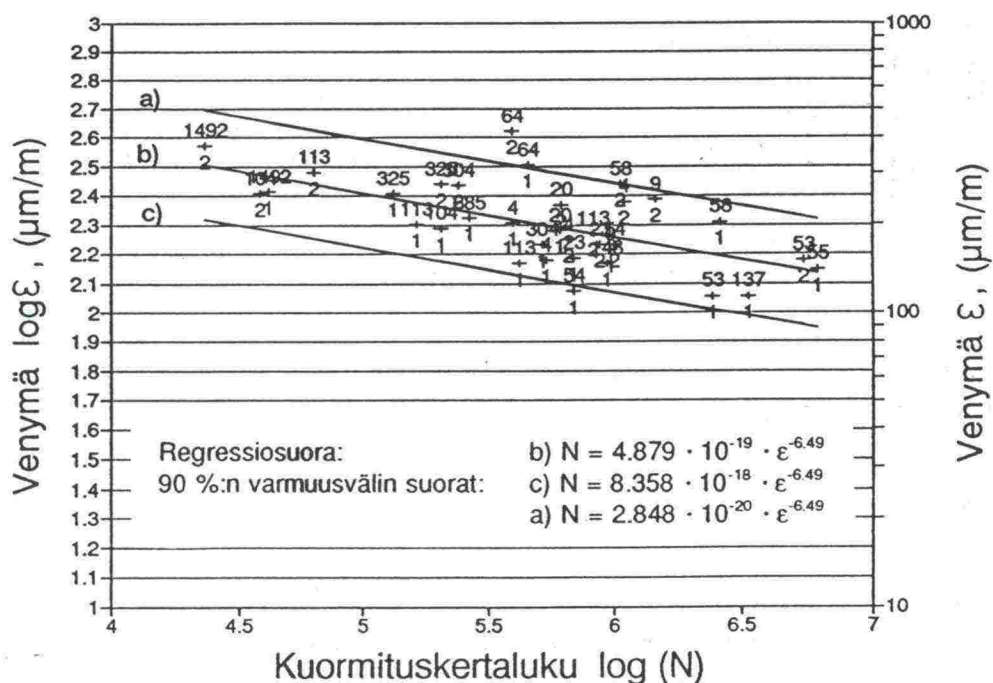
Väsymissuorat määritettiin esittämällä edellä lasketut kriittiset muodonmuutokset vaurioitumisen aiheuttaneiden kuormitusten funktiona täyslogaritmis- teikolla, jolla esitettynä riippuvuus on suoraviivainen. Suorien kulmakerroin on negatiivinen, mikä tarkoittaa, että mitä suurempi muodonmuutos on, sitä vähemmän tie kestää kuormituksia.

Tie katsottiin vaurioituneeksi, kun vauriosumma saavutti tason 10 m²/100 m. Näinkin pieni vauriosumma ilmentää tien vaurioitumista, koska yleensä halkeamat alkavat päällysteen alapinnasta ja kun ne näkyvät päällysteen

pinnassa, saattaa alapinnassa olla alkavia halkeamia jo moninkertaisesti pinnassa näkyviin verrattuna. Väsymissuoria määritettiin myös muille vaurioitumistasoille.

6.2 Asfalttibetonin väsymissuora

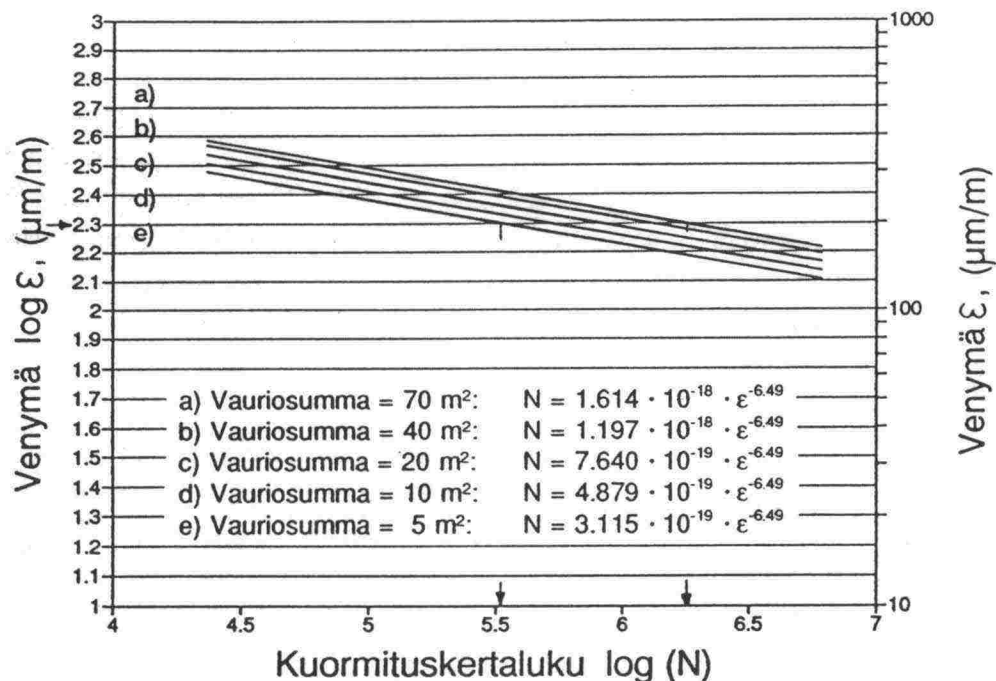
Asfalttibetonin väsymissuora saatiin päällysteen alapinnassa laskettujen vaakasuorien venymien perusteella. Kuvassa 9 on esitetty vauriosummalle 10 m²/100 m pisteet (lasketut venymät kyseiseen vaurioitumiseen kertyneiden kuormitusten funktiona). Pisteiden päällä oleva luku on tien numero ja alla oleva numero 1 tarkoittaa viimeisimmän päällystämisen jälkeistä tilannetta ja numero 2 sitä edeltävää. Kuvaan on piirretty regressiosuora ja 90 %:n varmuusvälin suorat. Kuvasta nähdään, että vaurioitumisen aiheuttavat kuormituskerrat kasvavat suhteessa päällysteen venymään korotettuna potenssiin 6,5.



Kuva 9: Vauriosummalle 10 m²/100 m lasketut päällysteen venymät kuormituskertojen funktiona, regressiosuora ja 90 %:n varmuusvälin suorat.

Kuvaan 10 on piirretty regressiosuorat vaurioasteille 5, 10, 20, 40 ja 70 m²/100 m. Väsymissuorien määrittämisessä on käytetty apuna kuvia 3 ja 4, joista on saatu kuormituskertaluvut. Venymät ovat samat kaikille vauriotasoille, koska kysymyksessä on initiaali- eli alkuvienymät. Suorat ovat täten yhden-suuntaisia ja mitä suurempi vauriotaso on, sitä enemmän se sallii kuormituskertoja ja sitä ylempänä kuvassa suora luonnollisesti on.

Esimerkiksi laskennallisen venymän ollessa 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ vauriotaso 5 $\text{m}^2/100 \text{ m}$ sallii 0,33 miljoonaa kuormitusta, kun taas vauriotaso 70 $\text{m}^2/100 \text{ m}$ sallii 1,7 miljoonaa kuormitusta. Vauriotason kasvaessa 14-kertaiseksi sallitut kuormituskerrat kasvavat vain 5-kertaisiksi. Tästä voidaan tehdä johtopäätöksiä järkevästä tien kunnostuksen ajankohdasta.



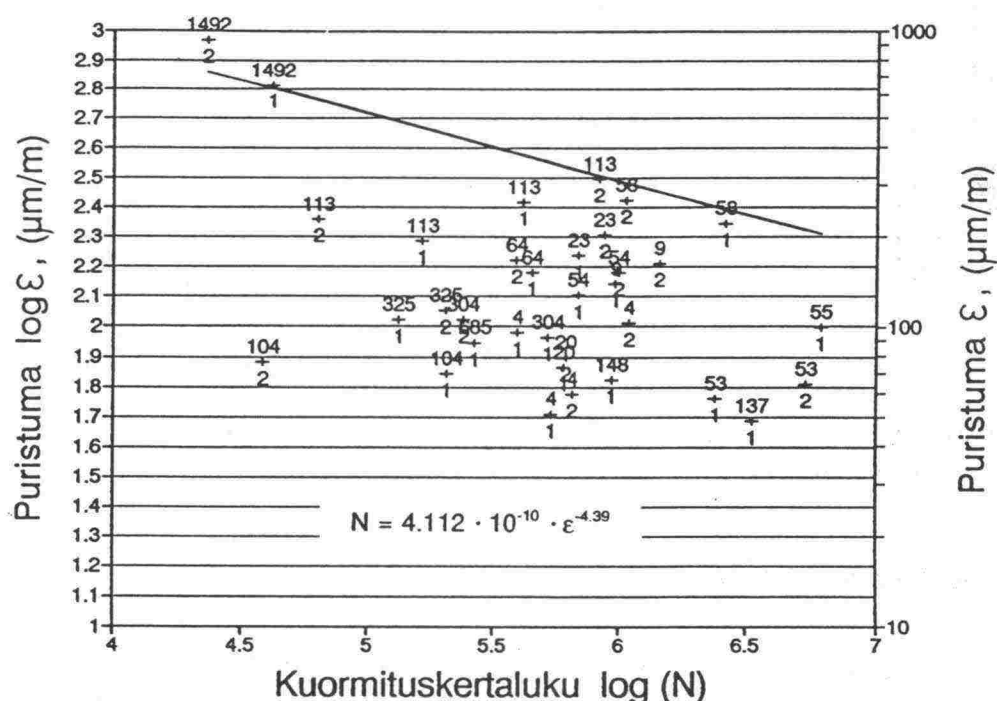
Kuva 10: Vauriosummille 5, 10, 20, 40 ja 70 $\text{m}^2/100 \text{ m}$ määritetyt päällysteen väsymisen regressiosuorat.

6.3 Pohjamaan väsymissuora

Kuvassa 11 on esitetty vauriosummalle 10 $\text{m}^2/100 \text{ m}$ lasketut pisteet (pystysuorat puristumat pohjamaan pinnassa kyseiseen vaurioitumiseen kertyneiden kuormitusten funktiona). Pisteiden päällä oleva luku on tien numero ja alla oleva numero 1 tarkoittaa viimeisimmän päällystämisen jälkeistä tilannetta ja numero 2 sitä edeltävää.

Tuloksissa on melkoinen hajonta. Tähän lienee suurin syy se, että tien pinnan vaurioista ei pystytty erottelamaan, mikä aiheutuu päällysteen, mikä pohjamaan heikkoudesta. Onkin oletettavaa, että suurin osa vaurioista on aiheutunut päällysrakenteen yläosan heikkoudesta ja vain kauimpana regressiosuoran yläpuolella olevat kohteet ovat saattaneet vaurioitua heikon pohjamaan takia.

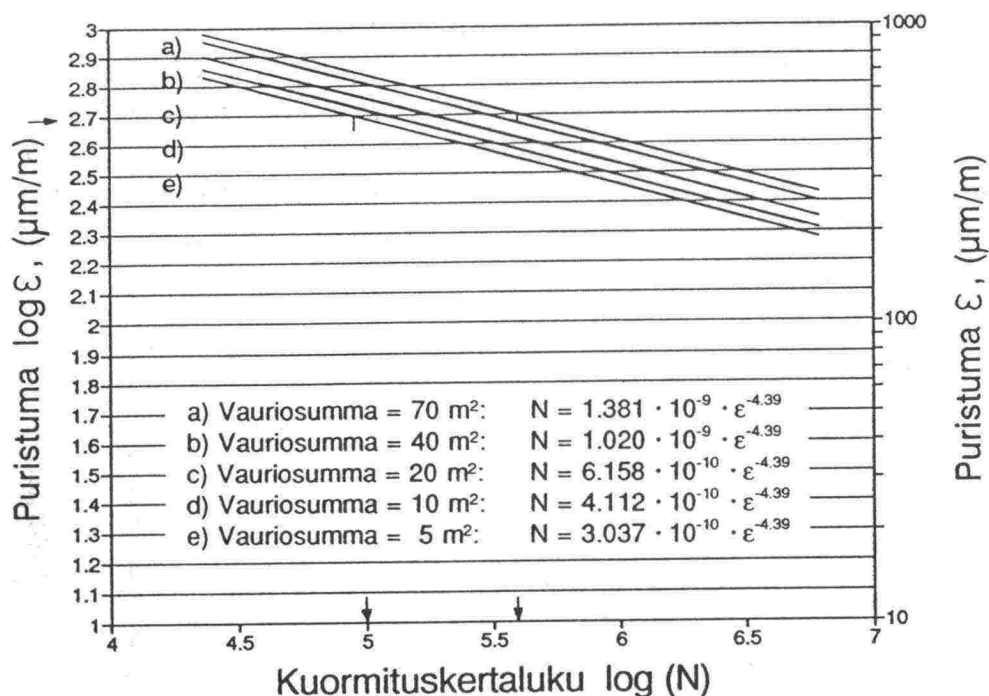
Lasketut puristumat pohjamaan pinnassa ovat pääosin hyvin pieniä. On erittäin todennäköistä, että tien vaurioituminen on tapahtunut päällysrakenteen eikä pohjamaan heikkouden takia. Siksi pohjamaan väsymissuoraa määrittäessä on otettu huomioon vain kuvan ylimmät pisteet ja suoran on päätelty olevan kuvan 11 mukainen. Kuvasta nähdään, että vaurioitumisen aiheuttavat kuormituskerrat kasvavat suhteessa pohjamaan puristumaan korotettuna potenssiin 4,4.



Kuva 11: Vauriosummalle 10 m²/100 m lasketut pohjamaan puristumat kuormituskertojen funktiona ja määritetty väsymissuora.

Kuvaan 12 on piirretty vastaavasti väsymissuorat vaurioasteille 5, 10, 20, 40 ja 70 m²/100 m. Väsymissuorien määrittämisessä on käytetty apuna kuvia 3 ja 4, joista on saatu kuormituskertaluvut. Puristumat pohjamaan pinnassa ovat samat kaikille vauriotasojille, koska kysymyksessä on initiaali- eli alkupuristumat. Suorat ovat täten yhdensuuntaisia ja mitä suurempi vauriotaso, sitä ylempänä kuvassa suora on, jolloin se sallii saman muodonmuutoksen arvolla enemmän kuormituksia.

Esimerkiksi laskennallisen puristuman ollessa 500 μm/m vauriotaso 5 m²/100 m sallii 0,10 miljoonaa kuormitusta, kun taas vauriotaso 70 m²/100 m sallii 0,42 miljoonaa kuormitusta. Vauriotason kasvaessa 14-kertaiseksi sallitut kuormituskerrat kasvavat vain hieman yli 4-kertaisiksi. Tästä voidaan päätellä tien kunnostuksen järkevä ajankohta.



Kuva 12: Vauriosummille 5, 10, 20, 40 ja 70 m²/100 m määritetyt pohjamaan väsymissuorat.

6.4 Vuoden jaksotus

Määritetyt väsymissuorat kuvaavat koko vuoden tien rasitusarvoja. Jos vuosi jaetaan osiin ja annetaan parametreille kutakin vuodenaikaa vastaavat arvot, laskelmat saadaan periaatteessa tarkemmiksi.

Tarkasteltavaksi otettiin neljä kohdetta ja vuosi jaettiin viiteen osaan: talvi, kevät, kesä1, kesä2 (kuuma aika) ja syksy. Kohteet ovat 53/19, 58/02, 64/04 ja 4/414. Jaksotus ja laskelmat tehtiin samaan tapaan kuin viitteessä /1/ on esitetty.

Liitteessä 5 on esitetty lähtöarvot ja tulokset. Moduulit määritettiin koekuopista otettujen näytteiden seulontatulosten /25/ ja takaisinlaskennan tulosten perusteella. Asfaltin moduulia pienennettiin vaurioitumisen perusteella ja muutettiin vastaamaan kunkin vuodenajan lämpötilaa /24/. Sitomattomien kerrosten kevään moduulit saatiin kertomalla kesän arvo soralle luvulla 0,85 ja hiekalle luvulla 0,8. Pohjamaan moduuleille käytettiin kertoimia 0,3 - 0,5. Syksyn moduulit saatiin kertomalla kesän arvot vastaavasti luvuilla 0,93 soralle, 0,9 hiekalle ja 0,8 pohjamaalle.

Liikennemäärällä tarkoitetaan tässä tierekisteristä raskaan liikenteen osuus huomioonottaen laskettuja kuormituskertalukuja. Kuormituskertaluvulla

(kestoiällä) tarkoitetaan väsymissuorien perusteella analyttisesti määritettyjä sallittuja kuormituskertalukuja.

Liikennemäärän oletettiin jakautuvan tasaisesti ympäri vuoden ja pysyvän vakiona eri vuosina. Vuodenaikojen kesto määritettiin kunkin paikkakunnan pitkäaikaisten säähavaintojen perusteella /26/. Päälysteen lämpötilana käytettiin vuorokauden keskimääräistä lämpötilaa. Kunkin vuodenajan liikennemäärä on n_i .

Asfaltin alapinnan ja pohjamaan muodonmuutokset laskettiin lineaarisella ohjelmalla (BISAR) 5 tonnin pyöräkuormalla. Muodonmuutoksia vastaavat kuormituskertaluvut (kestoiät) N_i määritettiin Shellin väsymissuorista 10 tonnin akselipainoille. Pohjamaalle käytettiin varmuustason 85% suoraa ja asfaltille kunkin vuodenajan päälysteen lämpötilaa vastaavaa suoraa.

Asfaltin alapinnan venyminä ja pohjamaan puristumina talviaikana on Virtaan koekentällä tehtyjen mittausten perusteella käytetty 15% syksyn arvoista /27/.

Kunakin vuodenaikana käytetyt osat rakenteen kestävydestä n_i/N_i summataan Minerin lakiin perustuen ja rakenteen kestoikä on lasketun summan käänteisluku, kun liikennemäärän oletetaan pysyvän vakiona eri vuosina.

Eri menetelmillä määritettyjä kestoikiä neljälle em. esimerkikohteelle on verrattu taulukossa 1. Kestoiät on määritetty edellä esitetyllä jaksotusmenetelmällä, tässä tutkimuksessa määritettyjen väsymissuorien ja Shellin väsymissuorien perusteella käyttäen luvussa 5.3 esitetyllä tavalla laskettuja venymiä sekä lähteessä /16/ esitetyn vaurioitumismallin perusteella.

Taulukko 1: Eri menetelmillä määritetyt kestoiät esimerkikohteille.

Kohde		Kestoiä, vuotta			
		jaksotus	yksi vuodenaika		vaur. malli /15/
			väs.suora	Shell	
53	AB	193	53	1846	18.8
	pohjamaa	7652	94	92758	18.8
58	AB	37.6	0.7	88.1	10.5
	pohjamaa	546	0.5	812	10.5
64	AB	12.3	0.2	22.8	2.1
	pohjamaa	1588	2.3	3221	2.1
4	AB	34.3	0.0	7.5	5.4
	pohjamaa	3271	2.1	3060	5.4

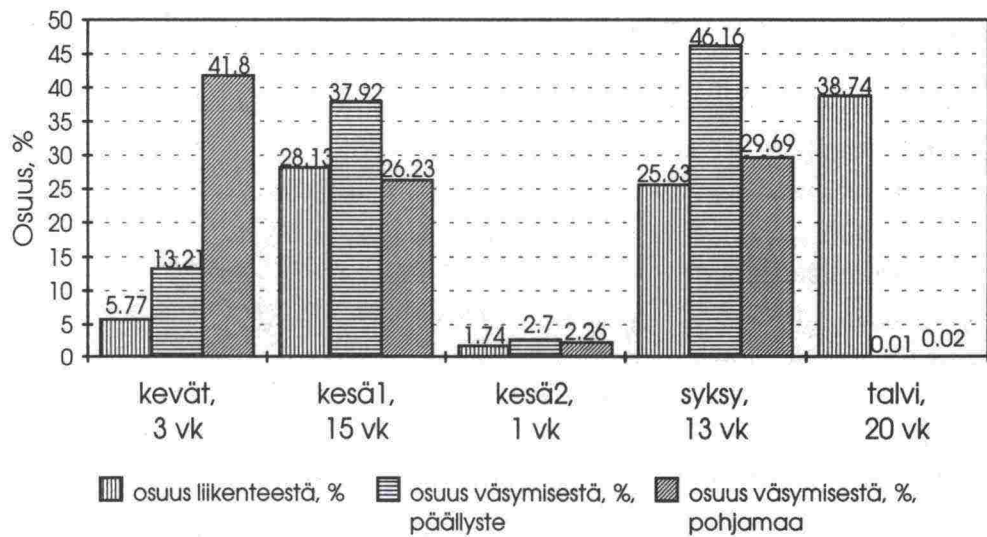
Havaitaan, että tässä tutkimuksessa määritetyillä suorilla saadaan lyhyempiä kestoikiä kuin muilla menetelmillä, osin epärealistisen lyhyitä. Näin saadut kestoiät vastannevat kuitenkin paremmin suomalaisia olosuhteita kuin esim. Shellin suorien avulla määritellyt kestoiät. Vaurioitumismallin antamaa kestoikää voi pitää vertailukohtana, koska se perustuu tehtyihin havaintoihin.

Lasketut kestoiät ovat ensimmäistä kohdetta lukuunottamatta asfalttipäällysteen osalta realistisia, ts. rakenteen suunnitellun kestoiän (yleensä 20 vuotta) mukaisia. Tosin ero vaurioitumismallilla laskettuun kestoikään on melko suuri. Paksulle asfalttipäällysteelle (Kt 53) kaikki menetelmät lukuunottamatta vaurioitumismallia antavat epärealistisen pitkiä kestoikiä sekä päällysteen että pohjamaan väsymisen perusteella. Tämä aiheutuu siitä, että asfalttipäällyste on niin paksu, että teoreettisesti lasketut venymät ovat pieniä ja kestoikä suuri.

Pohjamaiden osalta lasketut kestoiät ovat epärealistisen pitkiä. Tämä johtunee osaltaan routamitoituksen vuoksi paksuista rakenteista, jolloin pohjamaan väsyminen ei ole näissä kohteissa mitoituksen kannalta kriittinen tekijä. Toinen mahdollinen syy on liian korkeat sitomattomien kerrosten moduulien arvot, jolloin lasketut puristumat ovat pieniä ja sitä kautta käytetyllä kriteerillä lasketut kestoiät pitkiä.

Pohjamaan ja päällysteen väsymisestä aiheutuvien vaurioiden erottelu on väsymissuoria määritettäessä ollut mahdotonta. Vaurioitumismallin perusteella määritetty kestoikä on sama päällysteellä ja pohjamaalla, koska se perustuu nimenomaan havaittuihin vaurioihin. Pohjamaalle saatu suora ja sen avulla määritetyt lyhyet kestoiät saattavat olla puhtaasti teoreettisia, ikäänkuin kaikki vauriot olisivat aiheutuneet pohjamaan väsymisestä. Toisaalta Shellin suorat, joissa vaatimustaso pohjamaalle on alhaisempi ja joita on käytetty myös jaksotusmenetelmässä, antavat pohjamaalle epärealistisen pitkiä kestoikiä.

Kuvassa 13 on esitetty liikennemäärän ja rasittumisen osuus koko vuoden arvoista. Kunkin vuodenajan kohdalla vasen pylväs kuvaa ko. vuodenajan osuutta koko vuoden liikennemäärästä, seuraava asfalttipäällysteessä ja oikea pylväs pohjamaassa tapahtuvien rasitusten suhteellista osuutta koko vuoden aikana tapahtuvista rasituksista.



Kuva 13: Eri kausien liikennemäärän, päällysteen ja pohjamaan rasittumisen suhteelliset osuudet koko vuoden arvosta.

Verrattaessa kunkin vuodenajan osuutta liikennemäärästä ja vuotuisesta rasittumisesta havaitaan, että kevään osuus liikennemäärästä on alle 6%, mutta osuus pohjamaan väsymisestä on jopa puolet ja asfaltinkin väsymisestä yli 10% koko vuoden aikana tapahtuvasta väsymisestä (liite 5).

Tässä tarkastellut kohteet kuuluvat päätieverkkoon, joka on rakennettu melko korkean standardin mukaan. Tällöin kevään heikon kantavuuden kausi on oletettu vain kolmeksi viikoksi. Jos tarkastellaan alemman luokan tieverkkoa, kevään heikon kantavuuden kausi voi pahimmillaan olla epäedullisten säiden takia kuukausia. Sellaisissa tapauksissa heikon kantavuuden kausi voi määrätä tien sallitut kuormitukset lähes kokonaan. Tuntemalla paikalliset olosuhteet tarkkaan tie pystytään mitoittamaan jaksotusta hyväksikäyttäen optimaalisesti niin, että se kestää vaaditut kuormitukset.

Kesäajan (kesä1) osuus vaurioitumisesta vastaa jotakuinkin sen osuutta liikennemäärästä. Keväällä aiheutuvien vaurioiden suhde kevätajan liikennemäärään on pohjamaan osalta keskimäärin noin seitsemän, ts. yksi raskas ajoneuvo kevään heikoimpana aikana aiheuttaa pohjamaahan saman raskuuden kuin seitsemän vastaavaa ajoneuvoa vuoden keskimääräisissä olosuhteissa.

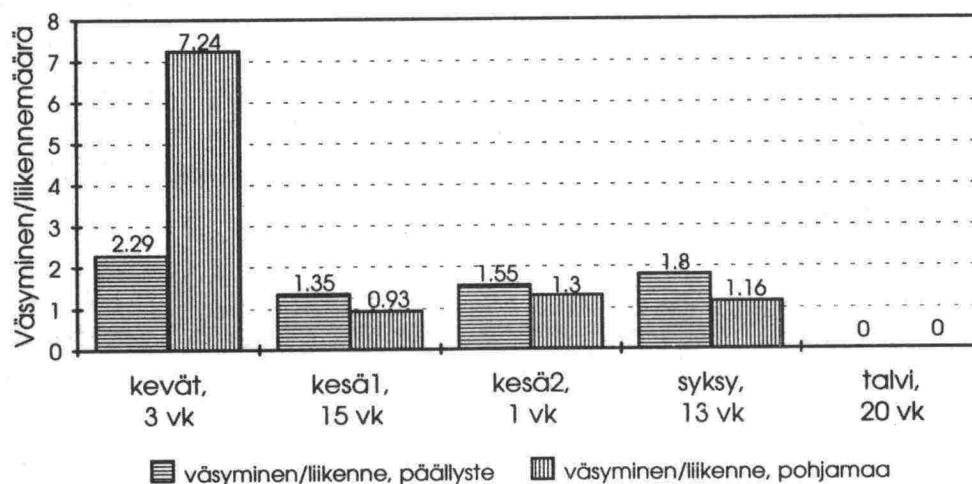
Kesän kuumen ajan (kesä2) osuus liikennemäärästä on vain n. 2 %, kuitenkin sen osuus tien rasittumisesta on noin puolitoistakertainen vastaavaan liikennemäärään verrattuna. Laskelmissa on käytetty vuorokauden keskilämpötiloja.

Jos tämä kausi jaettaisiin vielä osiin ja huippukuumat tunnit käsiteltäisiin erikseen, tämän kauden suhteellinen osuus tien rasittumisesta olisi suurempi.

Syksyllä rakenteen heikentyminen ei ole kovin suurta ja toisaalta asfalttikerroksen moduuli on alhaisen lämpötilan vuoksi korkea. Kauden rasittumisen suhde liikennemäärään on kuitenkin puolitoistakertainen.

Talvikauden osuus liikenteen aiheuttamasta tien vuotuisesta rasittumisesta on käytännössä mitätön. Talvikausi aiheuttaa kuitenkin ilmastosta aiheutuvia rasituksia tierakenteelle. Lämpöjännitykset aiheuttavat muodonmuutoksia, tierakenteen jäätymisestä ja sulamisesta aiheutuu vesipitoisuuden muutoksia, huokospaineen kasvua ja pahimmassa tapauksessa rakennekerrosten sekoittumista. Kaikki nämä kiihdyttävät tien vaurioitumista.

Kuvassa 14 on esitetty kunkin kauden kuormituskertymät suhteutettuna liikennemäärään (standardiakseliin). Normaalisti standardiakseli aiheuttaa kuormituksen, jonka arvo on 1. Jos kuvassa kauden suhteellinen kuormitus on suurempi kuin 1, päällyste tai pohjamaa on alttiimpi liikenteen aiheuttamalle kuormitukselle kuin keskimäärin vuoden aikana. Kevät on tien kannalta vaarallista aikaa ja varsinkin pohjamaan suhteen. Minimoimalla raskas liikenne sellaisina aikoina, jolloin tierakenne on altis rasittumiselle, voidaan päästä suuriin säästöihin tienpidon kustannuksissa. Tielaitos on jo harjoittanut teollisuuden suuntaan tiedotuspolitiikkaa, jolla saataisiin kuljetukset ajoitettua niin, että tieverkko joutuisi mahdollisimman pienelle rasitukselle.



Kuva 14: Eri kausien liikennemäärään suhteutetut kuormitukset.

Saadut lukuarvot ovat tietenkin suuresti riippuvaisia lähtöarvojen valinnasta, mikä on luonnollisesti pyritty tekemään mahdollisimman realistisesti. Laskelmissa ei ole otettu huomioon kulumisen ja deformatumisen aiheuttamaa urautumista, mikä kiihdyttää tien rasittumista.

7 TULOSTEN TARKASTELU

7.1 Lähtötiedot

Kriittiset muodonmuutokset laskettiin kesäolosuhteissa, eli päällysteen moduuli vastasi päällysteen lämpötilaa 21 °C ja sitomattomien kerrosten ja pohjamaan moduulit olivat parhaassa arvossaan. Kuormituskertaluvun määrittämisessä otettiin huomioon koko vuoden liikenne. Näillä oletuksilla oletettiin päästävän useimmissa tapauksissa optimitulokseen. Poikkeavissa olosuhteissa on syytä tehdä tarkemmat laskelmat jakamalla vuosi kausiin ja käyttämällä kullekin kaudelle ominaisia parametrien arvoja.

Tiemateriaalit eivät ole homogeenisia, kosteus- ja muut olosuhteet ovat erilaisia ja työn aikana syntyy epätarkkuuksista ja työtavoista aiheutuvia eroja saman tapaisten rakenteiden ominaisuuksiin. Näistä syistä aiheutuen tuloksissa on aina enemmän tai vähemmän hajontaa.

Havaintotiet ovat noin 3 km pitkiä, joten niiden vauriokartoitus on tehty liikkuvasta autosta. Täten on ymmärrettävää, että vauriotiedoissa saattaa olla epätarkkuutta ja hajontaa. Kerrospaksuudet on mitattu kullakin koetiellä yhdestä koekuopasta, joten kerrosten paksuuden vaihtelut aiheuttavat laskelmiin virhettä. Pohjaveden tasoa ja rakennekerrosten kosteutta ei ole havainnoitu, joten eri teiden moduulien vuodenaikavaihteluissa on eroja. Liikennemäärät ja kuormituskerrat on määritetty tierekisteritiedoista. Vaikka liikennelaskentaan on nykyään kehittyneet laitteet, akselipainomittauksia tulisi vielä tarkentaa.

Väsymissuorien määrittämiseen käytettävät venymät ovat periaatteessa ns. initiaali- eli alkuvenyymiä, ts. uuden rikkoutumattoman päällysteen venymiä. Pudotuspainomittaus on tehty eri teillä tien elinkaaren eri vaiheissa ja tämä aiheuttaa sen, että rakennekerroksille saadut moduulit eivät ole yhteismitallisia. Tämä asia on otettu huomioon korjaamalla eri päällystyskertoja vastaavia päällysteen moduuleja luvussa 5.3 esitetyllä tavalla. Tämän seikan vaikutus rakennekerrosten moduuleihin ja sitä kautta venymiin tulisi ottaa jatkossa tarkemmin huomioon.

Pudotuspainomittauksen tulokset, kerrospaksuudet ja venymät on esitetty liitteessä 3. Kerrospaksuudet ja kantavuudet vaihtelevat melko paljon, joten erityyppiset rakenteet ovat aineistossa hyvin edustettuina.

Takaisinlasketut asfaltin moduulit vaihtelevat varsin paljon. On otettava huomioon, että hyvin suuret ja hyvin pienet arvot esiintyvät usein kohteissa, joiden laskennassa ilmeni vaikeuksia. Toisaalta suurin laskettu päällysteen

moduuli (6900 MN/m^2) on mitattu 10°C :ssa ja lämpötilakorjatuksi moduuliksi saadaan 3330 MN/m^2 , jota voidaan pitää mielekkäänä tuloksena. Kolmessa kohteessa, joiden asfaltin variaatiokerroin = 0, asfaltin moduuliarvo on jouduttu arvioimaan.

Yleisesti ottaen pudotuspainolaitteella määritetyt moduuliarvot ovat esim. levykuormituskokeella määritettyjä arvoja korkeampia. Tähän voi olla syynä paitsi eriluonteinen (dynaaminen/staattinen) kuormitus, myös mittaustulosten käsittelytapa. Käytetty takaisinlaskentamenetelmä perustuu lineaariseen kimmoteoriaan.

Pohjamaan moduuliarvoja voidaan pitää yhtä kohdetta (4/414) lukuunottamatta realistisina ottaen huomioon, että mittaukset on tehty kesäaikaan. Sitomattomien kerrosten moduulit ovat takaisinlaskennassa epäluotettavimpia. Toisaalta asfaltin venymään vaikuttaa eniten asfaltin moduuli. Moduuliarvojen vaihtelu (variaatiokerroin) on 20 - 35 %, mikä vastaa melko hyvin havaittua vaihtelua.

7.2 Päällysteen väsymissuora

Suorista laskettavan muodonmuutoksen ja kuormituskertojen riippuvuuden eksponentti on noin 6,5. Se on oikeaa suuruusluokkaa, jos verrataan sitä yleisesti muualla saatuihin tuloksiin.

Kuvassa 15 on esitetty tämän tutkimuksen regressiosuorat muutaman muualla määritetyn väsymissuoran kanssa. Väsymissuorat on tehty yhteismitallisiksi muuntamalla ne kaikki vastaamaan samaa standardiakselipainoa (8,2 tonnia).

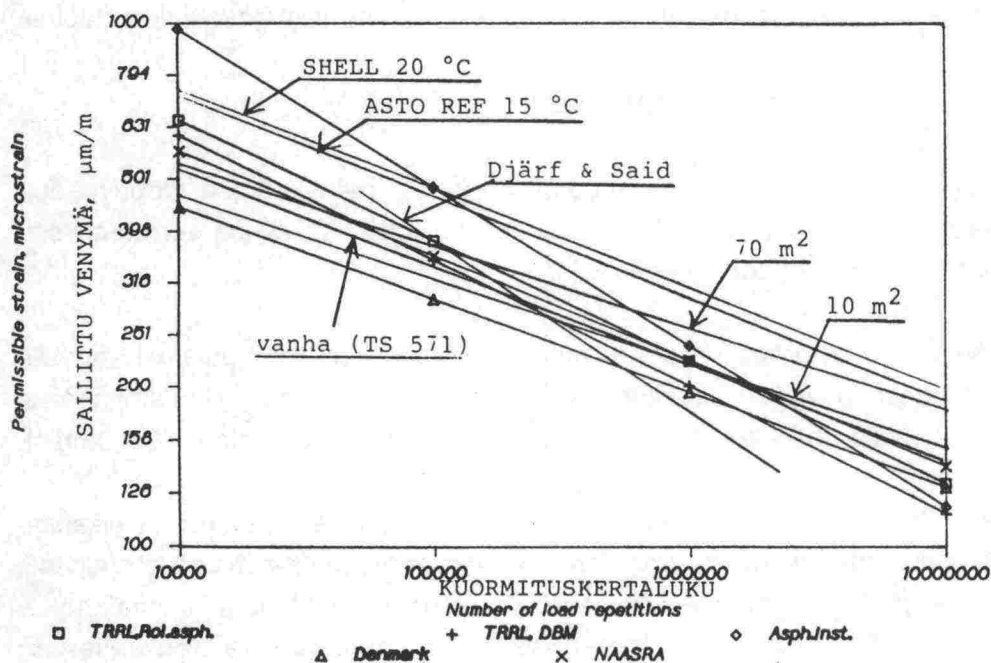
Tässä tutkimuksessa saatujen väsymissuorien kulmakertoimet ovat itseisarvoltaan suurimmat eli niiden venymän aiheuttaman kuormitussuhteen eksponentti on suurin (6,5). Tanskalaisten suoralla on lähes yhtä suuri kulmakerroin. ASTO-tutkimuksissa laboratoriokokeissa (15°C) saatu referenssimassan eksponentti on 5,4. ASTO-suora on sijainniltaan hieman ylempänä kuin vauriotason 70 m^2 regressiosuora ja on lähes yhteneväinen Shellin 20°C :n suoran kanssa /7/.

VTT:ssa vuonna 1986 tehdyssä tutkimuksessa /3/ saatu väsymissuora sijoittuu suunnilleen 10 m^2 :n ja 70 m^2 :n regressiosuorien väliin. Sen kulmakerroin sovitettiin Shellin suoran mukaan (=5), joten silloin saatu suora on jyrkempi kuin tässä tutkimuksessa saadut.

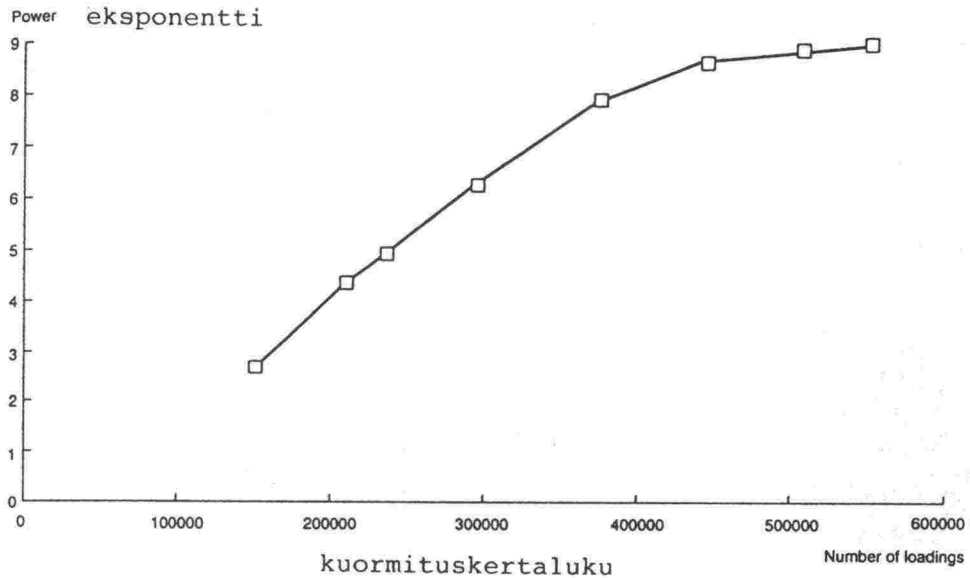
Saadut regressiosuorat sijoittuvat hyvin muuhun joukkoon. Suomen vaikeissa olosuhteissa on kuitenkin syytä noudattaa tiettyä varovaisuutta mitoituksessa ja käyttää esimerkiksi 85 % varmuustasoa. Tällöin tässä tutkimuksessa saadut

väsymissuorat asettuvat ryhmän alalaitaan eli samaa muodonmuutosta vastaisi Suomessa hieman pienempi sallittu kuormituskertaluku.

Äskettäin Ruotsissa julkaistun tutkimuksen /28/ alustavien tulosten mukainen suora poikkeaa huomattavasti tämän tutkimuksen tuloksista, sen kuormitusriippuvuuden eksponentti on vain 3,1. Suora on määritetty ensimmäisten vaurioiden perusteella ja tämä saattaa selittää pienen eksponentin arvon. Sama ilmiö oli havaittavissa OECD:n kiertoratakokeessa Nantesissa. Kun vauriot lisääntyivät, eksponentti kasvoi. Kuvassa 16 on esitetty eksponentin kasvu vauriokehityksen funktiona, kun vertailtavina olivat 10 ja 11,5 tonnin akselipainojen vaikutukset. Kuvan mukaan OECD:n kokeessa kuormitus-suhteen eksponentti oli aluksi pieni, mutta kasvoi vaurioitumisen lisääntyessä ja lähestyi asymptoottisesti arvoa 9 /29/. Myös Asphalt Institutin suora on lähes yhtä jyrkkä.



Kuva 15: Päällysteen väsymissuora muiden joukossa.



Kuva 16: Kuormitussuhteen eksponentin kehitys vaurioitumisen funktiona OECD:n kiertoratakokeessa /29/.

Eri maissa ja laitoksissa tehtyjen väsymissuorien vertailussa on oltava varovainen. Tutkimukset on tehty erilaisista materiaaleista ja tutkimusmenetelmissäkin on suuria eroavuuksia, kuten vauriokriteereissäänkin. Väsymistutkimusten harmonisoinnin alue on laaja ja työ on vasta alullaan. Tässä vaiheessa on syytä uskoa eniten omilla materiaaleilla ja tunnetuilla menetelmillä tehtyihin tutkimuksiin.

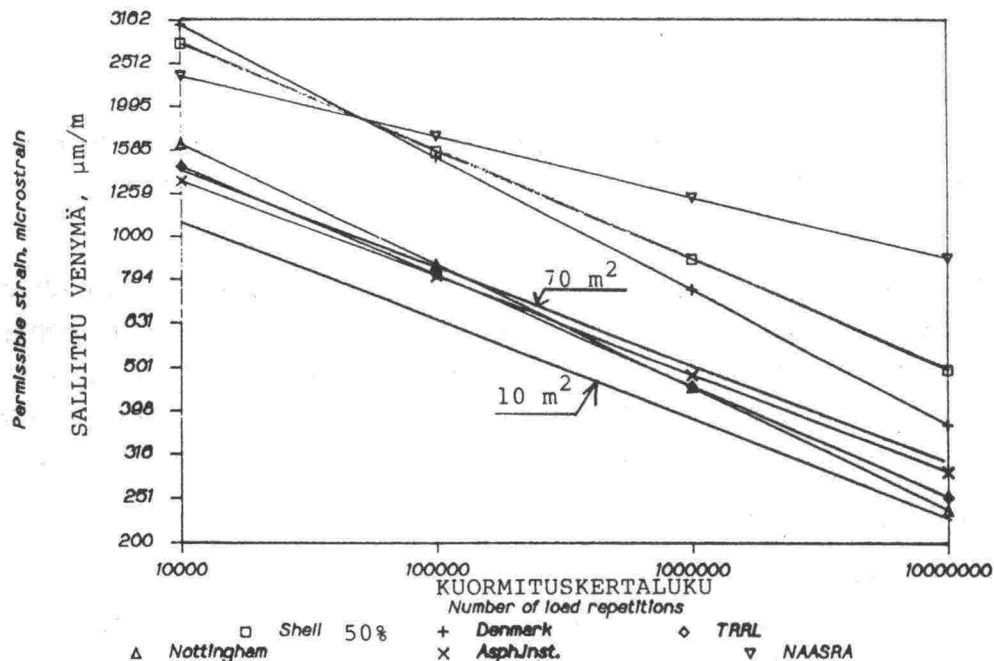
Päällysteen väsymissuorien jäännösarvot on esitetty liitteissä 4/1 - 5. Uudenmaan piirin teissä elinikä oli pienempi kuin väsymissuoralta määritetty. Syynä voi olla se, että pohjamaa on sulana pidempään kuin pohjoisessa ja rannikon lähellä kosteus on suurempi kuin sisämaassa. Kantavuudeltaan paremmilla teillä elinikä on pienempi kuin mallilla saatu (Uudenmaan tiet). Tien ja päällysteen leveys pienentävät elinikää ennusteeseen verrattuna. Liikennemäärä, päällysteen ja sitomattomien kerrosten paksuudet eivät vaikuta ennusteeseen.

7.3 Pohjamaan väsymissuora

Riippuvuusyhtälöiden eksponentiksi tulee 4,4, kun yleisimmin käytetyn Shellin yhtälön eksponentti on tasan 4. Hajonta on suurempi kuin päällysteen tuloksissa, mikä on ymmärrettävää materiaalien erilaisuuden vuoksi.

Pohjamaan pinnan laskennalliset puristumat olivat pääsääntöisesti hyvin pieniä. Tästä pääteltiin, että päällysteen vaurioituminen tapahtui päällysrakenteen heikkouden eikä pohjamaan takia. Syynä voivat olla myös laskennassa käytetyt liian suuret arvot tierakenteen materiaalimoduuleille. Pohjamaan väsymissuora määritettiin pelkästään pohjamaan pinnan suurimpien puristumien perusteella, koska vain näiden katsottiin aiheuttaneen tien vaurioitumisen.

Kuvassa 17 on esitetty tämän tutkimuksen tulos muutaman muualla saadun tuloksen joukossa. Väsymissuorat on tehty yhteismitallisiksi vastaamaan kaikki standardiakselipainoa 8,2 tonnia. Vauriosumman 70 m²/100 m väsymissuora on melko lähellä Nottinghamin, TRRL:n ja Asphalt Institutin suoria. Vauriosumman 10 m²/100 m väsymissuora kulkee hieman muun ryhmän alapuolella.



Kuva 17. Pohjamaan väsymissuora muiden joukossa.

Pohjamaan väsymissuorien jäännösarvot on esitetty liitteissä 4/6 - 10. Sitomattomien kerrosten paksuus vaikutti siten, että ohuet kerrokset kestivät enemmän kuin ennuste näytti. Muut tekijät eivät vaikuttaneet ennusteeseen.

8 SUOSITUKSET

Tierakenne tulee mitoittaa niin, että tien elinikänä vuosikustannus minimoidaan. Tierakenteen rikkoontuminenkaan ei ole katastrofi ja tiet tulee suunnitella niiden merkityksen mukaan optimaaliselle varmuustasolle. Tässä voidaan käyttää todennäköisyyslaskentaa apuna. Alemman luokan tie voidaan suunnitella pienemmillä varmuusmarginaaleilla, kun taas moottoritie tulee suunnitella korkean standardin mukaan.

Julkaisun /17/ mukaan suurimmat sallitut vauriosummat ($\text{m}^2/100 \text{ m}$) eri luokan teille ovat:

- päätiet	40
- seudulliset tiet	70
- muut tiet	100

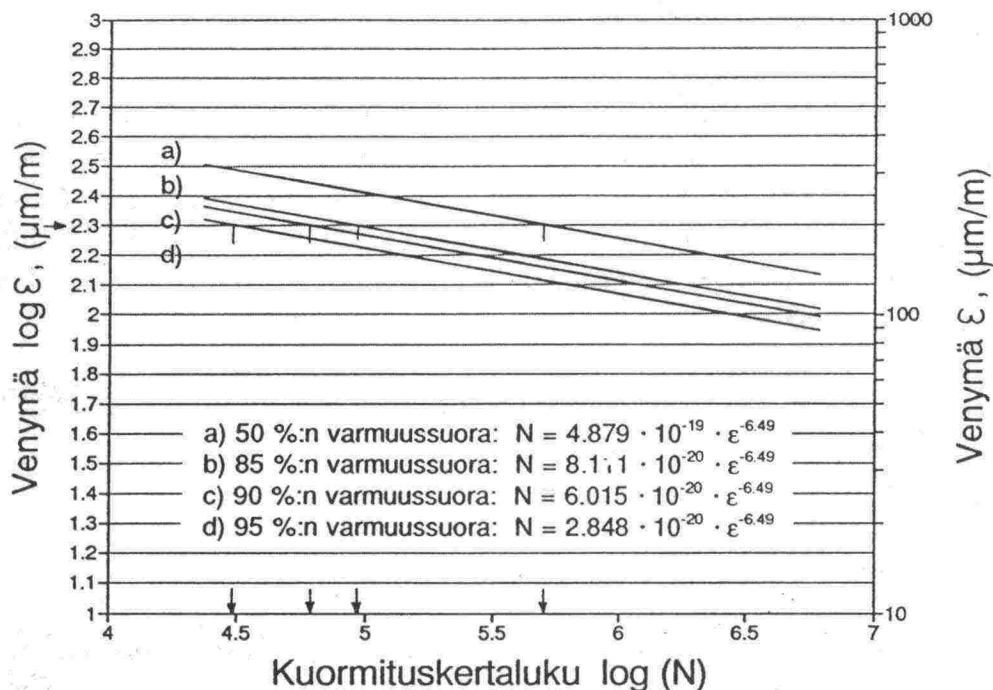
Tutkimuksen tuloksissa oli hajontaa, joka aiheutui osin lähtötietojen epätarkkuuksista ja osin laskentamenetelmien oletuksista. Kuvassa 18 on esitetty vauriosummalle $10 \text{ m}^2/100 \text{ m}$ eri varmuustasojen väsymissuoria, joista voidaan katsoa varmuustason merkitys. Kuvassa on esimerkki $200 \mu\text{m/m}$ venymää ($=0,0002$) vastaavat sallitut kuormitukset eri varmuustasoille:

50 %	500000
85 %	82000
90 %	61000
95 %	29000

Suunnittelun lähtökohdaksi ehdotetaan käytettäväksi 85 % varmuustasoa. Eri luokan teille ehdotetaan vauriokriteeriksi seuraavia vauriosumman ($\text{m}^2/100 \text{ m}$) arvoja:

- moottoritiet	20
- valtatie	40
- muut tiet	70

Kunnossapitoa varten ehdotetaan eräänlaiseksi hälytysrajaksi vauriosumman arvoa $10 \text{ m}^2/100 \text{ m}$. Tästä voidaan kokemusten mukaan ennustaa vauriokehitys melko tarkasti. Tämä auttaa kunnossapidon suunnittelua ja ajoitusta. Kun vaurioita syntyy lisää, vaurioennustetta voidaan tarkentaa ja ajoittaa kunnossapidon toimenpiteet niin, että minkään tieluokan vauriotason suurimpia sallittuja tasoja ei ylitetä.

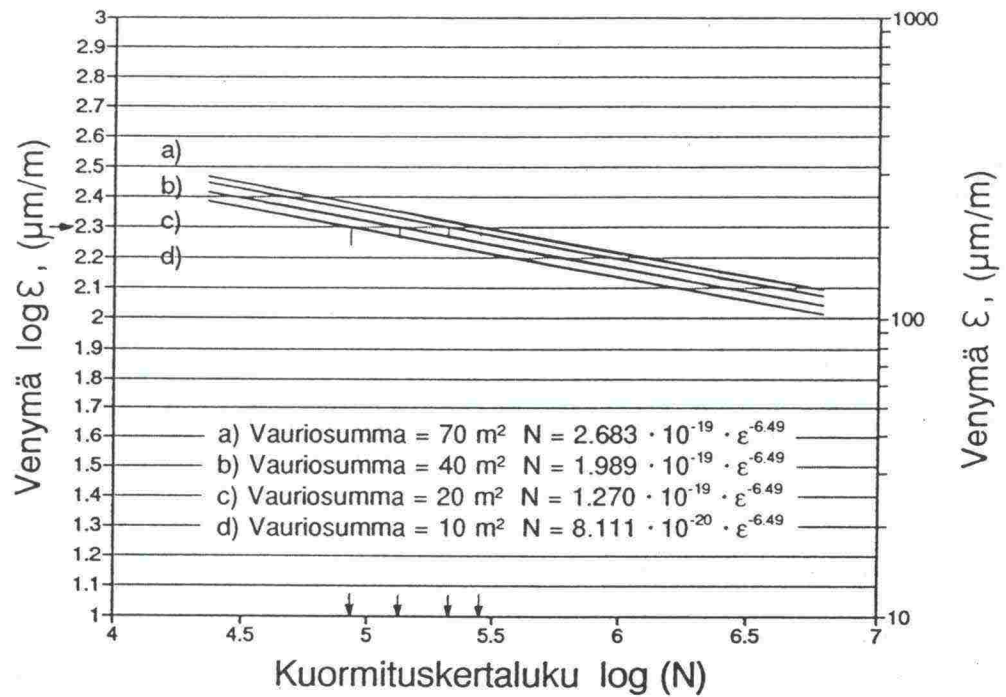


Kuva 18: Eri varmuustasojen väsymissuorat päällysteelle (vauriosummalle $10 \text{ m}^2/100 \text{ m}$).

Kuvaan 19 on piirretty vauriosummille 10, 20, 40 ja $70 \text{ m}^2/100 \text{ m}$ varmuustason 85 % väsymissuorat. Kuvassa on esimerkki 200 μm/m venymää ($=0,0002$) vastaavat sallitut kuormitukset eri vauriosumman tasoille:

- 10 ($\text{m}^2/100 \text{ m}$)	82000
- 20 ($\text{m}^2/100 \text{ m}$)	130000
- 40 ($\text{m}^2/100 \text{ m}$)	200000
- 70 ($\text{m}^2/100 \text{ m}$)	270000

Liitteessä 6/1 - 3 on esitetty vauriosummille 20, 40 ja $70 \text{ m}^2/100 \text{ m}$ varmuustasoja 50, 85, 90 ja 95 % vastaavat väsymissuorat. Näitä voidaan käyttää mitoitus- ja kunnossapidon suunnitteluun valitsemalla kuhunkin tarkoitukseen sopiva vauriosumma/varmuustaso-kriteeri.



Kuva 19: Eri vauriotasojen väsymissuorat varmuustasolla 85 % päällysteelle.

Pohjamaan väsymissuorien perusteella tehtävä mitoitus tehdään kuvan 12 väsymissuorien perusteella. Eri varmuustasojen suoria ei määritetty.

9 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen tavoitteena oli saada aikaan väsymissuorat tierakenteen mitoitusta varten Suomen olosuhteisiin. Väsymissuoraan tarvitaan kriittinen muodonmuutos ja sitä vastaava sallittujen kuormitusten määrä. Lähtötietoina käytettiin havaintotieverkostosta saatua aineistoa.

Vaurioinventoinnista saatiin vauriosumman avulla selville tien kunnon kehittyminen ajan funktiona. Kutakin vaurioastetta vastaava kuormituskertaluku saatiin määritettyä tierekisterin liikennemäärätiedoista viimeisessä havaintotieraportissa /16/ esitetyn vaurioitumisnopeuskertoimen avulla.

Kriittisinä muodonmuutoksina käsiteltiin päällysteen alapinnan vaakasuoraa venymää ja pohjamaan pinnan pystysuoraa puristumaa.

Kriittiset muodonmuutokset määritettiin pudotuspainomittausten ja rakennekerrospaksuuksien perusteella. Pudotuspainomittauksista laskettiin Modulus-ohjelmalla rakennekerrosten moduulit kesän olosuhteissa ja näiden avulla laskettiin kriittiset muodonmuutokset Bisar-monikerrosohjelmalla.

Eri vaurioasteita vastaavat väsymissuorat muodostettiin tämän jälkeen päällysteelle ja pohjamaalle esittämällä kriittisen muodonmuutoksen regressioyhtälö sallittujen kuormitusten funktiona täyslogaritmiasteikolla.

Väsymissuorille laskettiin myös varmuustasoja 85%, 90 % ja 95 % vastaavat suorat sekä verrattiin muualla saatuihin tuloksiin.

Esimerkkinä laskettiin neljä kohdetta tarkemmin jakamalla vuosi eri kausiin ja käyttämällä laskelmissa kausille ominaisia parametrien arvoja.

Eri luokan teille annettiin suositukset väsymissuoriksi, joissa otettiin huomioon tien merkitys. Varmuustasona käytettiin 85 % tasoa. Raportissa on aineistoa muillekin kriteereille.

Tutkimuksesta voidaan tehdä seuraavia johtopäätöksiä:

1. Saadut suorat ovat kulmakertoimeltaan järkeviä, muodonmuutoksen ja sallitun kuormituskertaluvun välistä riippuvuutta kuvaavan yhtälön eksponentiksi tuli päällysteelle 6,5 ja pohjamaalle 4,4. Mitä suurempi eksponentti on, sitä herkemmin rakenne vaurioituu ylikuormien takia.
2. Jos käytetään 85 % varmuustasoa, tutkimuksessa saadut väsymissuorat sijoittuivat muualla esitettyihin nähden hieman niiden alapuolelle. Tämä

merkitsee sitä, että samalla kuormituksella rakenne sallii pienemmän kriittisen muodonmuutoksen eli rakenteet on suunniteltava paksummiksi tai paremmista materiaaleista.

3. Hajontaa tuloksissa oli luonnollisesti melko paljon. Tähän on syynä epätarkkuus joko lähtötiedoissa (materiaalien laatu, kerrospaksuudet, raskaan liikenteen määrä, vaurioiden määräyty) tai laskentamenetelmien oletuksissa (kerrosten homogeenisuus, isotrooppisuus, kimmoisuus).
4. Vaurioista ei voitu päätellä, mitkä aiheutuivat pohjamaasta, mitkä päällysteestä. Tulosten perusteella pääteltiin, että suurin osa teistä oli vaurioitunut päällysrakenteen yläosan takia. Pohjamaan väsymissuorat jouduttiin täten määrittämään vain muutamien kohteiden perusteella.
5. Jaksottamalla vuosi kausiin havaittiin, että kevät on varsinkin koheesio-pohjamaalle rasittavaa aikaa; rasitukset olivat seitsemänkertaisia koko vuoden keskimääräiseen arvoon verrattuna.
6. Kesän kuumien aika (1 viikko) aiheutti laskelmien mukaan vain 3 % tien vuotuisesta väsymisrasituksesta laskettuna vuorokautisten keskilämpötilojen mukaan. Jos käytettäisiin tarkempaa jakoa (esim. vrk kahteen osaan, kuumaan ja viileään), kauden rasitusvaikutus kasvaisi. Jos otetaan huomioon mahdollisen deformaation aiheuttama päällysteen oheneminen, kauden rasitusvaikutus kasvaa edelleen.
7. Vaurioinventointi tulisi tehdä mahdollisimman tarkasti. Koeosuuden pituus tulee sovittaa voimavarojen mukaan.
8. Rakennekerrosten materiaalimoduulien laskennassa käytetty takaisinlaskentamenetelmä ei vielä nykyisellään ole riittävän luotettava. Laboratoriossa tehdyillä dynaamisen moduulin määrityksillä voidaan tarkentaa tulosta.
9. Kerrospaksuudet määritettiin vain yhdestä koekuopasta kullakin tiellä. Esimerkiksi maatutkan käyttö antaisi paremman tiedon koko koeosuuden paksuuksista ja mahdollisista paksuusvaihteluista.
10. Pohjamaan ja sitomattomien kerrosten kosteusolosuhteet ja -vaihtelut tulisi selvittää.
11. Liikennemäärä tulisi selvittää nykyistä tarkemmin koekohteittain, erityisesti raskaan liikenteen osalta.

12. Analyttisessä mitoituksessa voidaan käyttää saatuja väsymissuoria, kun muistetaan niiden oletukset (parametrit kesän arvoja).
13. Laskettujen esimerkkien perusteella kesän arvojen käyttö vastaa hyvin koko vuoden tilannetta pääteillä. Alemman luokan teillä (ohuilla päällysrakenteilla) on vuoden heikoimman kantavuuden aika selvitettävä tapauskohtaisesti ja mitoitettava sen mukaan.
14. Tierakenteen parametrien vaihtelu vuoden eri aikoina on selvitettävä esim. TPPT:n projektina.
15. Tutkimusmenetelmä on hyvä ja laskelmat kannattaa uusina muutaman vuoden kuluttua käyttäen tarkempia tien rakenne-, materiaali- ja vauriohavaintoja esim. SHRP/LTPP-, PMS- tai mahdollisilta TPPT-koeteiltä.

10 KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Huhtala, M., Palojärven - Olkkalan koetien päällysrakenteen teoreettiset laskelmat. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, Tiedonanto 59. Espoo 1980. 103 s. + liitt. 7 s.
2. Pienimäki, M., Huhtala, M., Tierakenteessa mitattujen ja teoreettisesti laskettujen rasitusten vertailu. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 570. Espoo 1986. 35 s.
3. Pienimäki, M., Huhtala, M., Tierakenteen mitoitusmenetelmiin sisältyvien väsymissuorien määrittäminen. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 571. Espoo 1986. 32 s.+liitt. 6 s.
4. Pienimäki, M., Huhtala, M., Pihlajamäki, J., Kuorma-autoakselistojen vertailu. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 572. Espoo 1986. 41 s. + liitt. 10 s.
5. Pienimäki, M., Huhtala, M., Tierakenteen kantavuuden herkkyyshanalyysi. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 692. Espoo 1988. 28 s.
6. Jämsä, H., Huhtala, M., Pihlajamäki, J., Tierakenteen teoreettiset laskelmat, Odemarkin menetelmän tarkastelu. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 756. Espoo 1988. 23 s. + liitt. 6 s.
7. Spoof, H., Asfaltin väsyminen. Asfalttipäällysteiden tutkimusohjelma ASTO, massatyöryhmä (4). Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio, tutkimusraportti 74. Espoo 1992. 57 s. + liitt. 42 s.
8. Utmattningskriterier for asfaltbelegninger. Nordisk Vegteknisk Forbund, Utvalg 33, Asfaltbelegninger. Rapport nr. 7. Oslo 1992. 58 s. + liitt. 17 s.
9. Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskeva seurantatutkimus v. 1979. E. Kankare ja H. Saarinen. VTT:n tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 193. Espoo 1980
10. Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskeva seurantatutkimus. E. Kankare ja H. Saarinen. VTT:n tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 217. Espoo 1980

11. Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskeva seurantatutkimus. H. Saarinen. VTT:n tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 428. Espoo 1984
12. Teiden kunto ja palvelutaso. Tutkimustulokset havaintoteiltä 1979 - 1983, H. Saarinen ja H. Jämsä. VTT tiedotteita 429. Espoo 1985
13. Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskeva seurantatutkimus. H. Jämsä. VTT:n tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 578. Espoo 1986
14. Havaintotieaineistosta 1979 - 1987 laskettuja vaurioitumismalleja. H. Jämsä ja T. Kurki. tutkimusselostus 689. Espoo 1988
15. Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskeva seurantatutkimus. T. Kurki. Tutkimusraportti 55. Espoo 1991
16. Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskeva seurantatutkimus. Mittaukset ja havainnot 1991 - 1992. T. Kurki. Tielaitos, Geokeskus. Tielaitoksen selvityksiä 19/1993. Helsinki 1993. 29 s. + liitt. 87 s.
17. Päälysteiden kunnostuskriteerit. Eero Lehtipuu, VTT Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio n:o 95. Espoo 1992. xx s.
18. Uzan, J., Scullion, T., Michalak, C., Paredes., Lytton, R. L., A Microcomputer Based Procedure for Backcalculation Layer Moduli From FWD Data. Research Report 1123-1. Texas Transportation Institute. College Station, Texas 1988. 82 s.
19. Scullion, T., Michalak, C., Modulus 4.0: User's Manual. Research Report 1123-4f. Texas Transportation Institute. College Station, Texas 1990. 41 s.
20. Rohde, G. T., Scullion, T., Modulus 4.0: Expansion and Validation of the Modulus Backcalculation System. Research Report 1123-3. Texas Transportation Institute. College Station, Texas 1990. 117 s.
21. SHRP'S Layer Moduli Backcalculation Procedure, PCS/LAW Engineering, Maryland, 1992.
22. Mahoney, J. P., Newcomb, D. E., Jackson, N. C., Pierce, L. M., Pavement Moduli Backcalculation Short Course. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Reno, 1991. s. 4:1 - 8.

23. Dejong, D.L., Peutz, M. G. F., Korswagen, A. R., Computer Program Bisar. Layered systems under normal and tangential surface loads. External report. Shell Research B.V. Amsterdam 1973. 40 s. + liitt. 120 s.
24. Temperature-deflection Corrections for Asphalt Pavements, "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures," Appendix L, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1986. 6 s.
25. Teiden suunnittelu. TVL:n ohjeet, kansio B, IV tien rakenne. Tie- ja vesirakennushallitus, tiensuunnittelutoimisto. Helsinki 1984. 115 s.
26. Heino, R., Hellsten, E., Tilastoja Suomen ilmastosta 1961 - 1980. Ilmatieteen laitos. Helsinki 1983. 560 s.
27. Huhtala, M., Pihlajamäki, J., Kuorma-autoakselistojen vaikutus tierakenteiden rasittumiseen vuoden 1984 mittauksiin perustuen. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, tie- ja liikennelaboratorio, tutkimusselostus 506. Espoo 1986. 56 s.+liitt. 19 s.
28. Djärf, L., Said, Laboratory fatigue properties compared with field performance. VTI särtryck Nr 191. Stockholm 1993. 15 s.
29. OECD Full Scale Pavement Tests. OECD, Road Transport Research, Scientific Expert Group I4. Paris 1991. 266 s.

11 LIITTEET

1. Vaurioinventointilomake
2. Vaurioinventointitulokset 1979-1992
3. Pudotuspainomittausten tulokset
4. Jäännösarvot eri muuttujille laskettuna päällysteelle ja pohjamaalle
5. Vuoden jaksotus, laskelmien lähtöarvot ja tulokset
6. Päällysteen väsymissuorat vauriosummille 20, 40 ja 70 m²/100 m varmuustasoilla 50, 85, 90 ja 95 %

Sijainti m	Vaurio																					
	1 kpl	ast y m	2 kpl	ast y m	3 kpl	ast y m	4 m	ast y m	5 m	ast y m	6 m	ast y m	7 m ²	ast y m	8 kpl	ast y m	9 m ²	ast y m	10 kpl	ast y m	11 m ²	ast y m
0-1	1		4						35													
1-2			3		1		60															
2-3			3		1																	
3-4			4																			
4-5			3		1																	
5-6	1		5		1		3															
6-7	1		4																			
7-8			5																			
8-9			6		3				12													
9-10	1		5		5																	
10-11	2		5		1				32		5											
11-12	4		4				10															
12-13	4		5		3		44		10													
13-14	5		8		1		52				5											
14-15	1		2		3		60															

Vaurio

- 1 polkkihalkema ajokaistan poikki
- 2 polkkihalkema ajoradan poikki
- 3 pieniä polkkihalkemia
- 4 pituushalkema kaistan keskiosassa
- 5 pituushalkema keskisaumassa
- 6 vinohalkema
- 7 verkkohalkema
- 8 routakouma

Poikkileikkaus

- 1 pengeri
- 2 viettävä
- 3 leikkaus
- 4 toispuolinen kallioleikkaus
- 5 kallioleikkaus
- 6 0-tasaus

Vaurion sijainti

- 1 ajourassa
- 2 piennar
- 3 muu

TSV vaurion kohdalla

- 1 vaakasuora
- 2 kalteva
- 3 kupera taite

Pohjamaa

- 1 koheesioaalaji
- 2 kirkkaaalaji
- 3 kallio

Maaston laatu

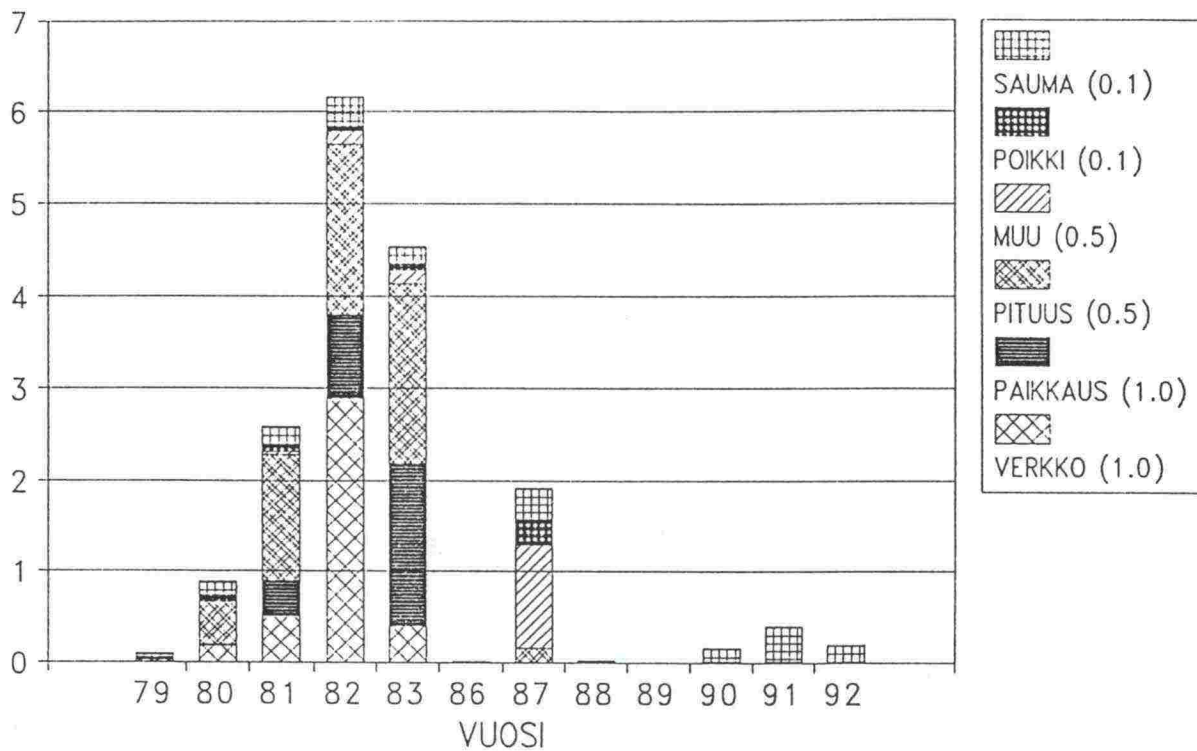
- 1 pelto
- 2 metsä
- 3 suota

Kuivatus

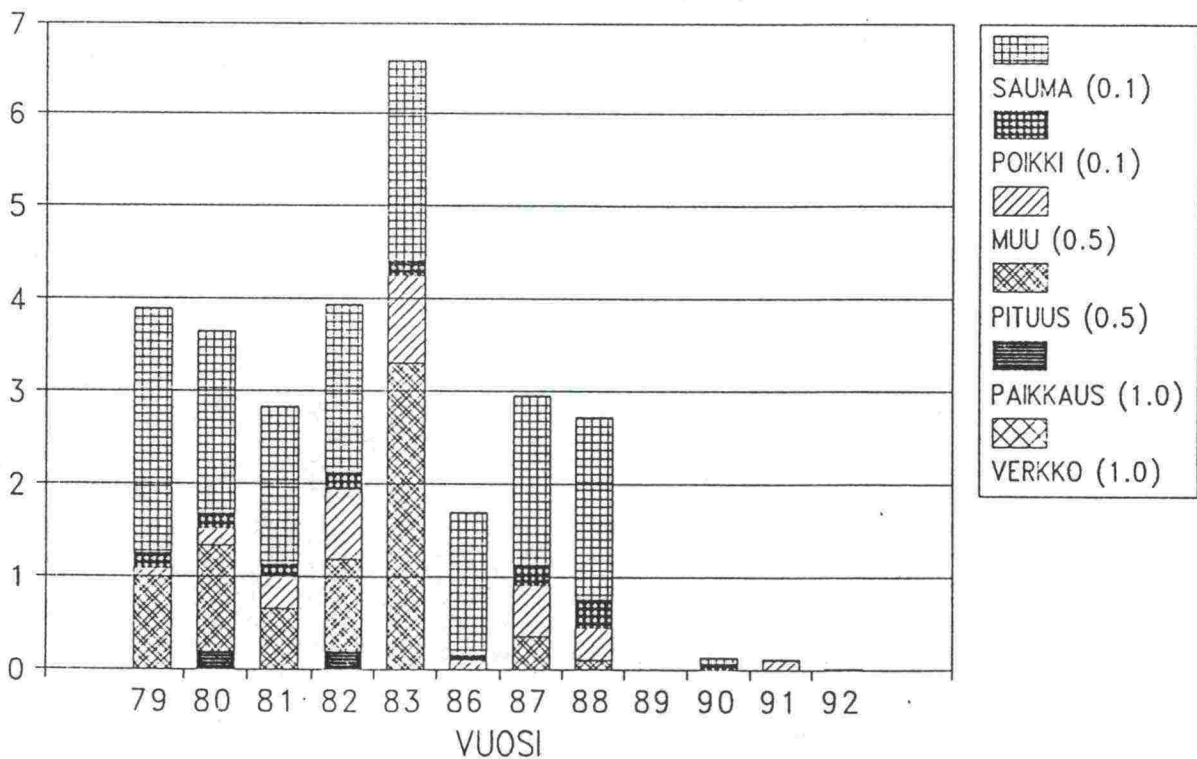
- 1 riittävä
- 2 riittämätön
(vettä ojassa)

51/10
VAURIOSUMMA (m2)

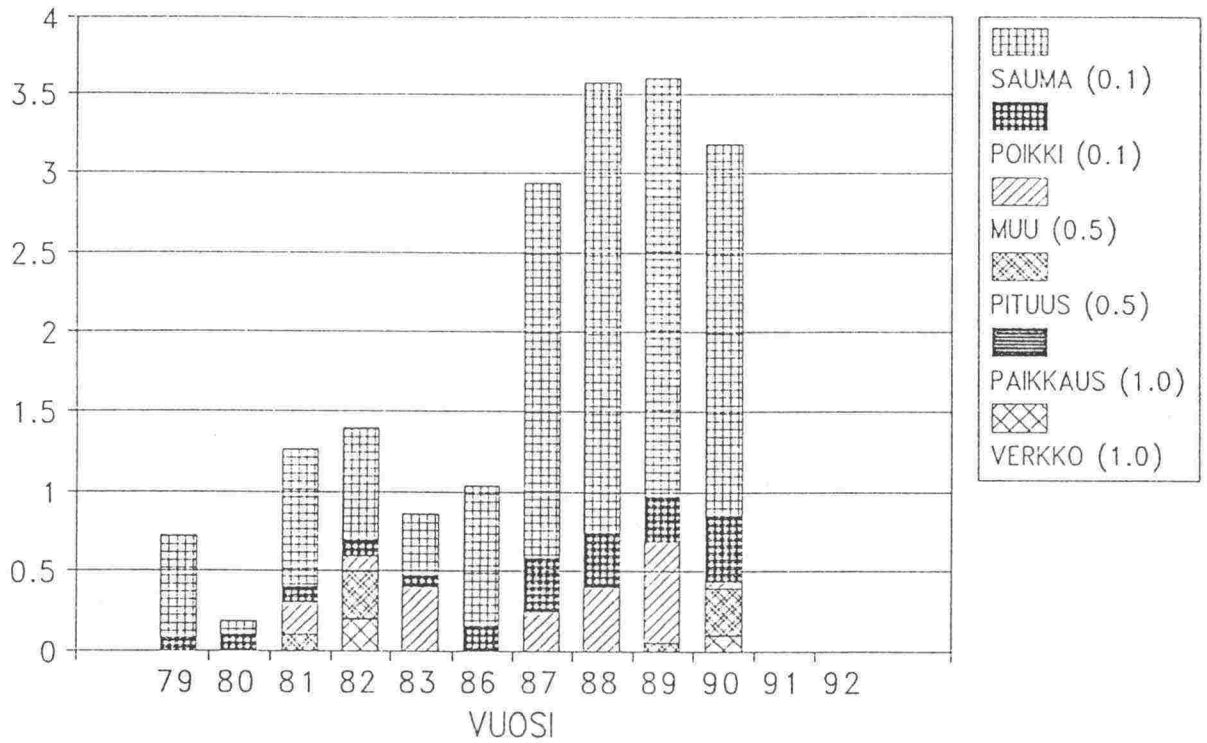
LIITE 2/1



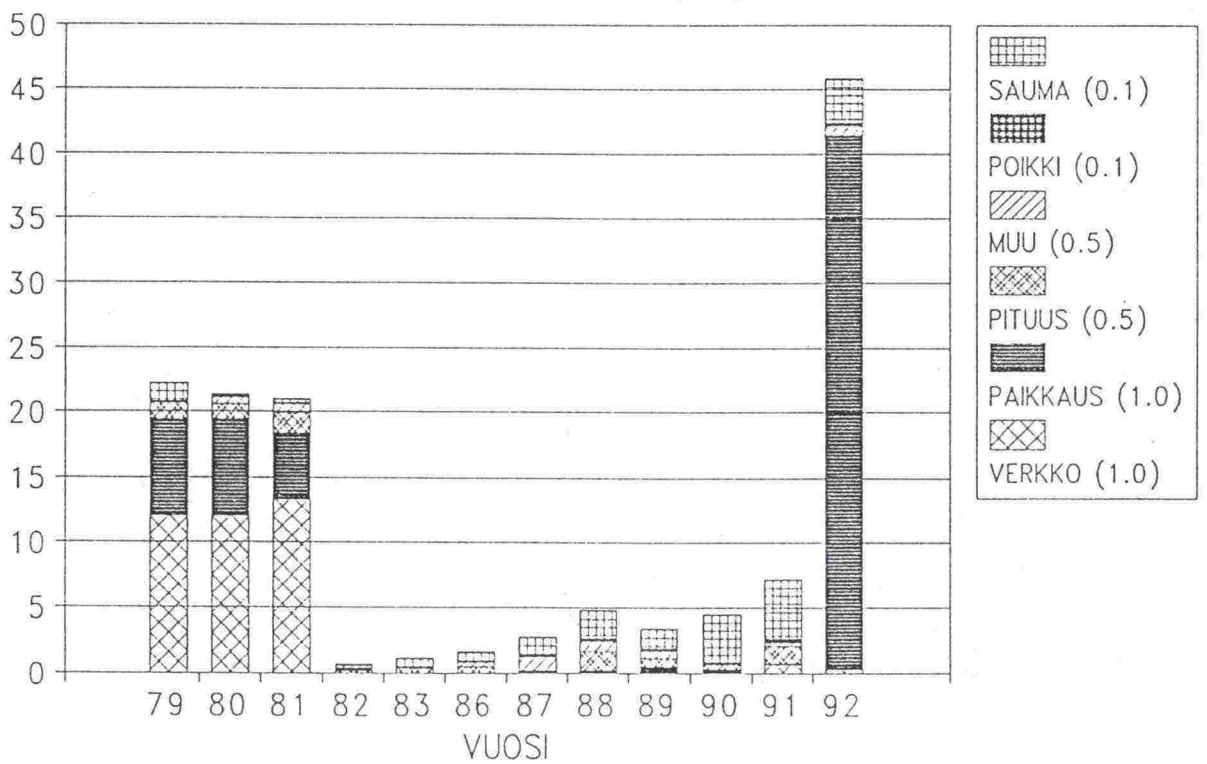
53/19
VAURIOSUMMA (m2)



55/5
VAURIOSUMMA (m²)

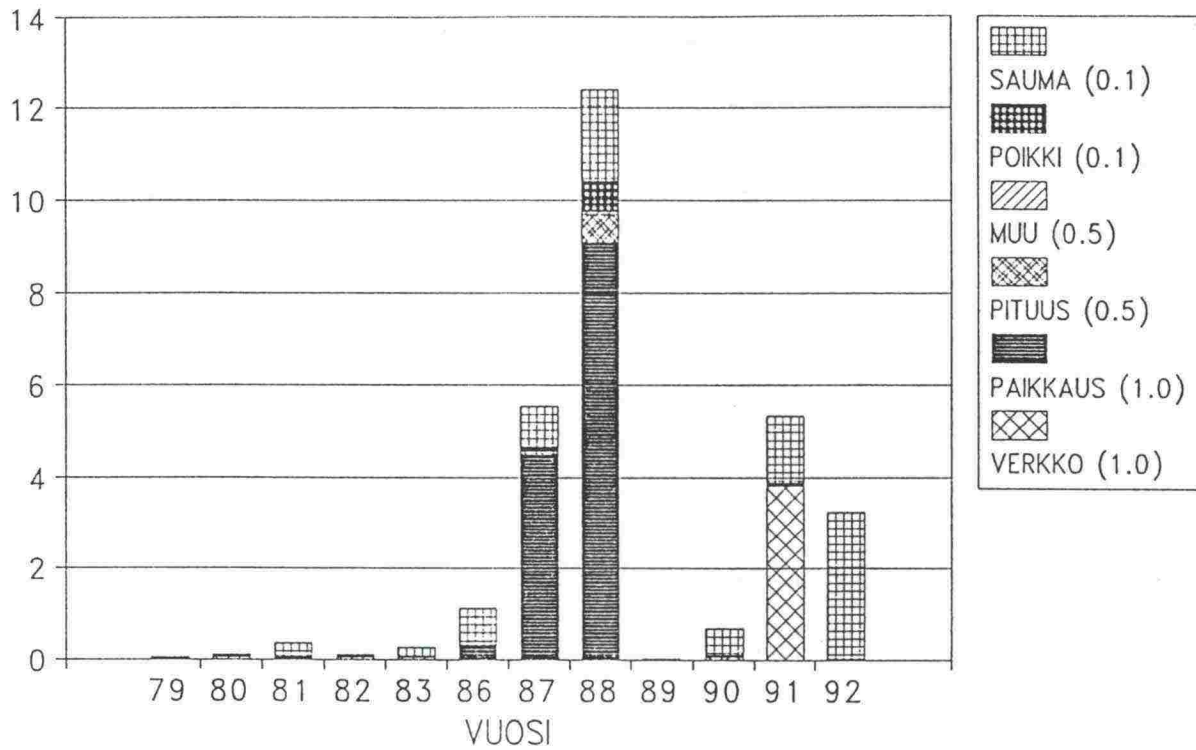


104/6
VAURIOSUMMA (m²)

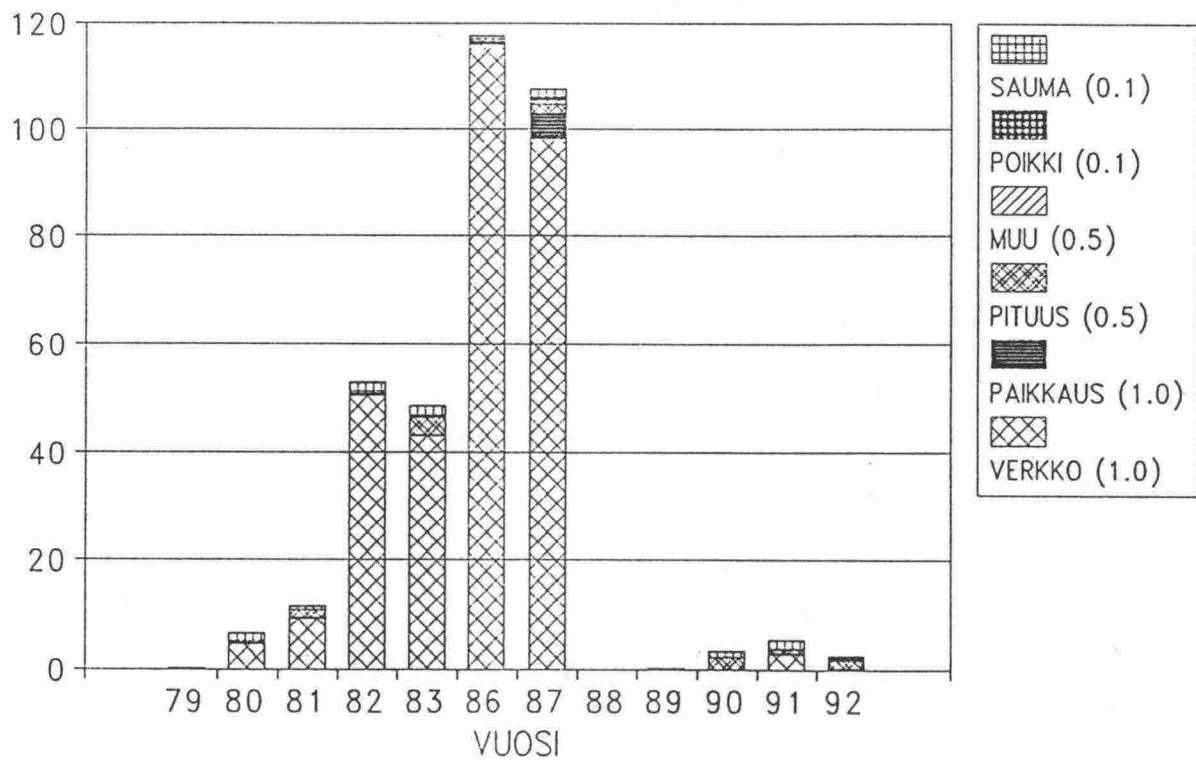


113/1
VAURIOSUMMA (m2)

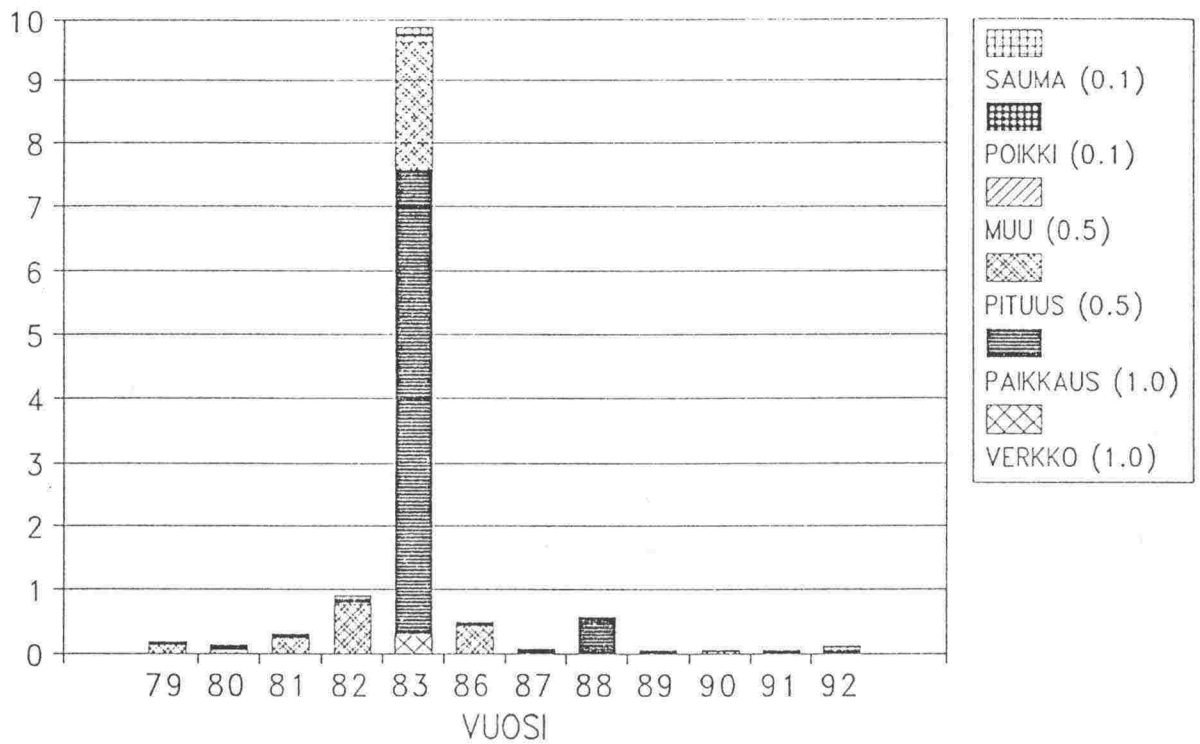
LIITE 2/3



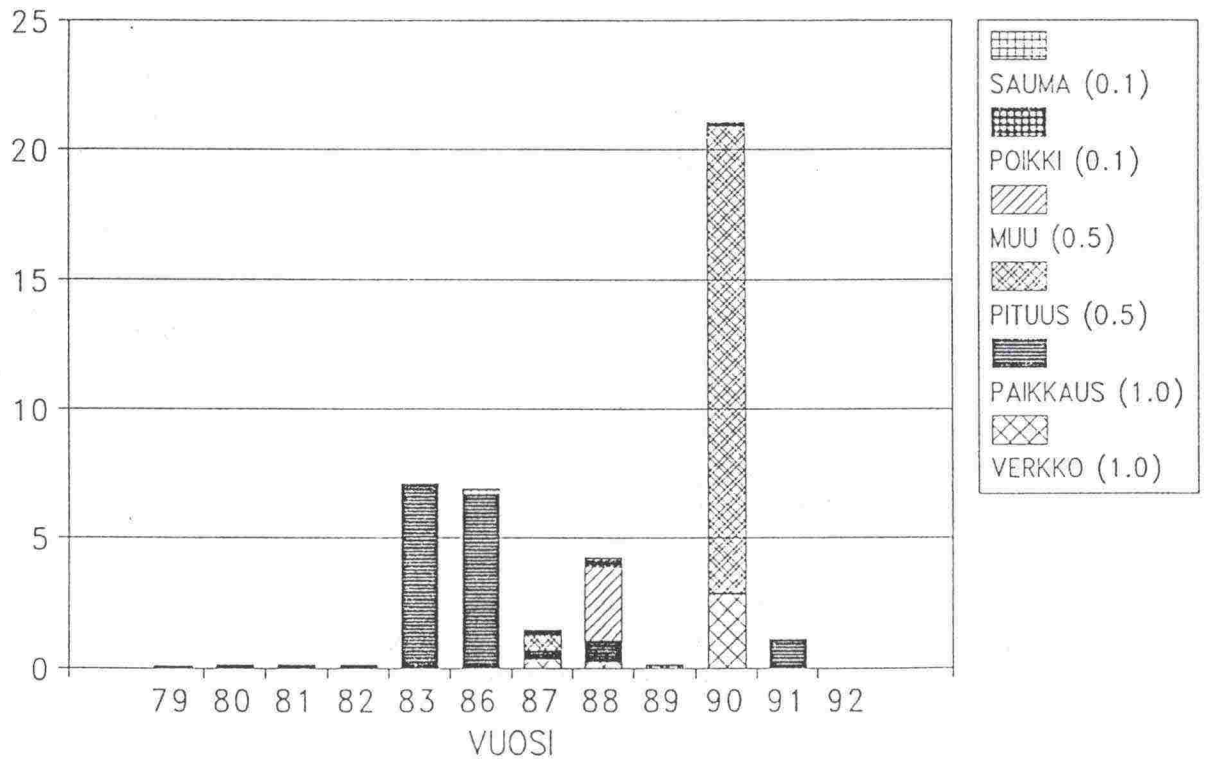
113/9
VAURIOSUMMA (m2)



137/6
VAURIOSUMMA (m2)

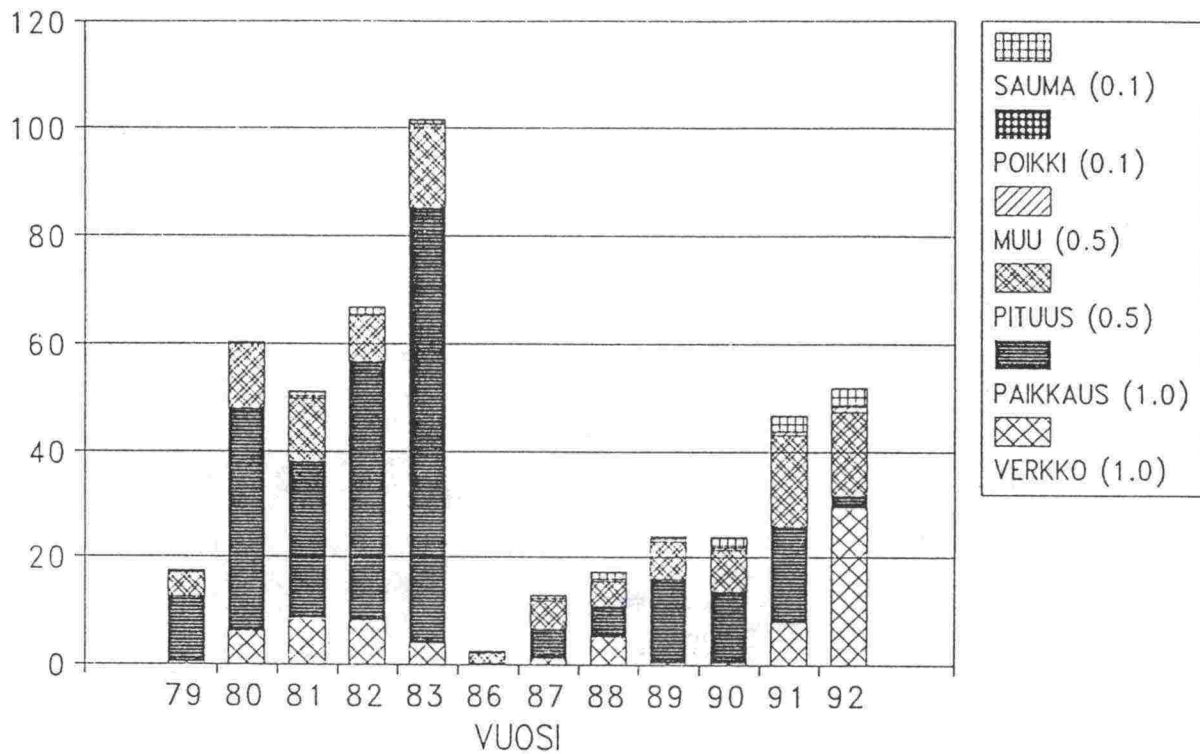


148/7
VAURIOSUMMA (m2)

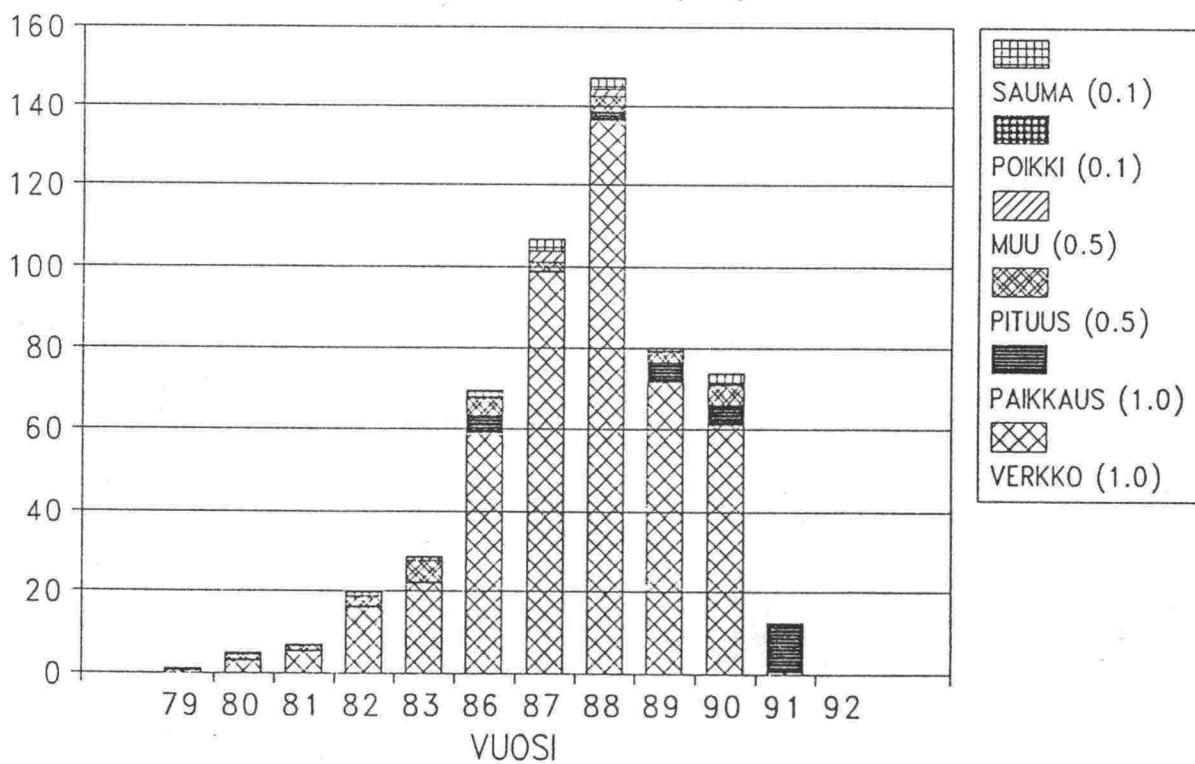


1492/1
VAURIOSUMMA (m2)

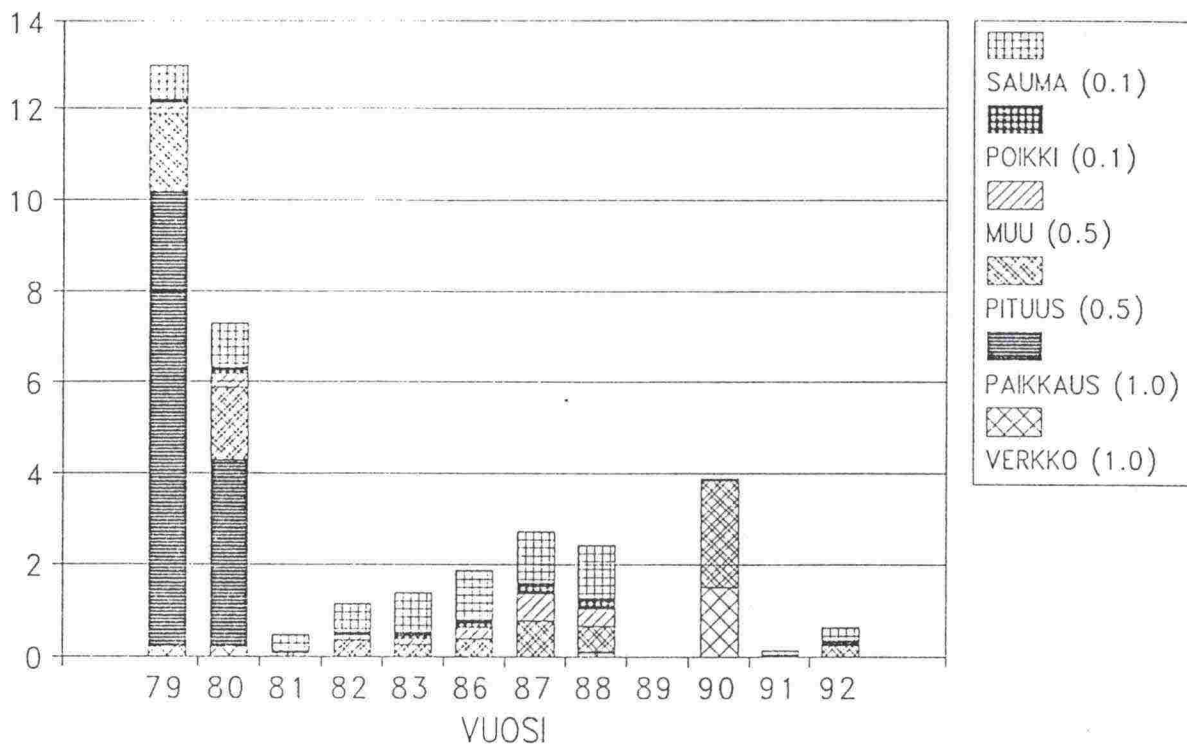
LIITE 2/5



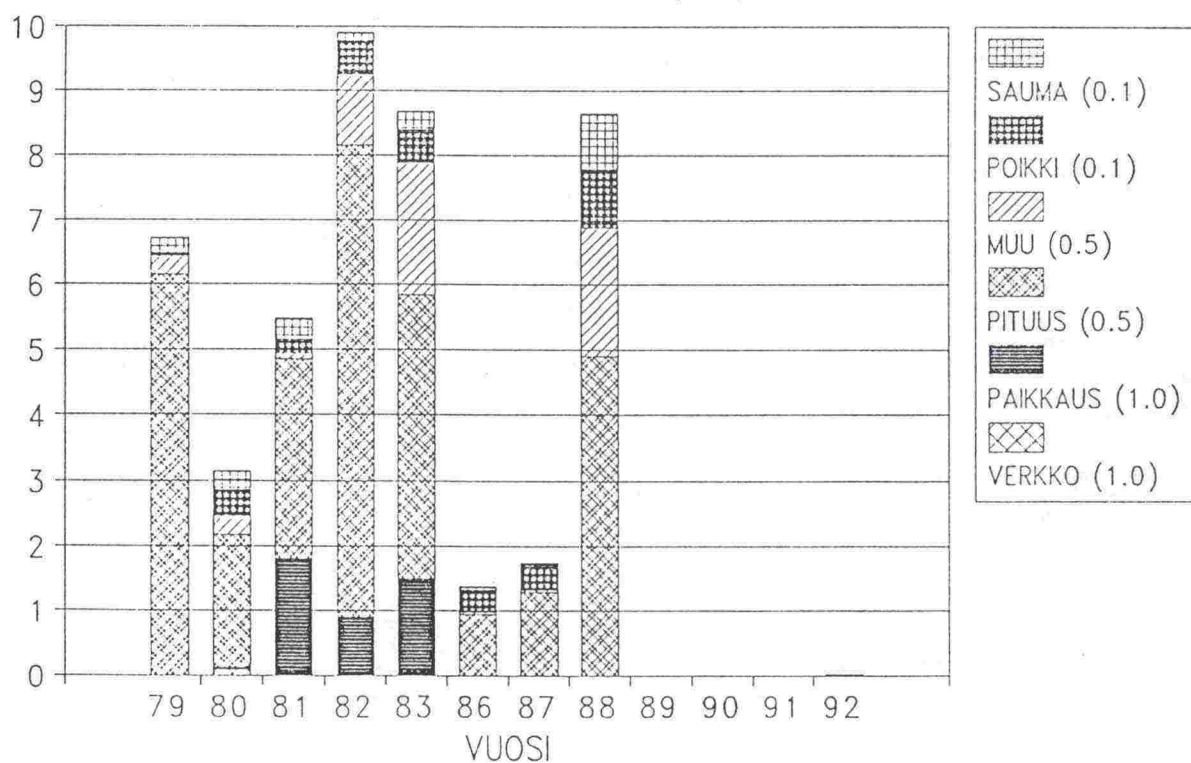
11859/1
VAURIOSUMMA (m2)



12/11
VAURIOSUMMA (m2)

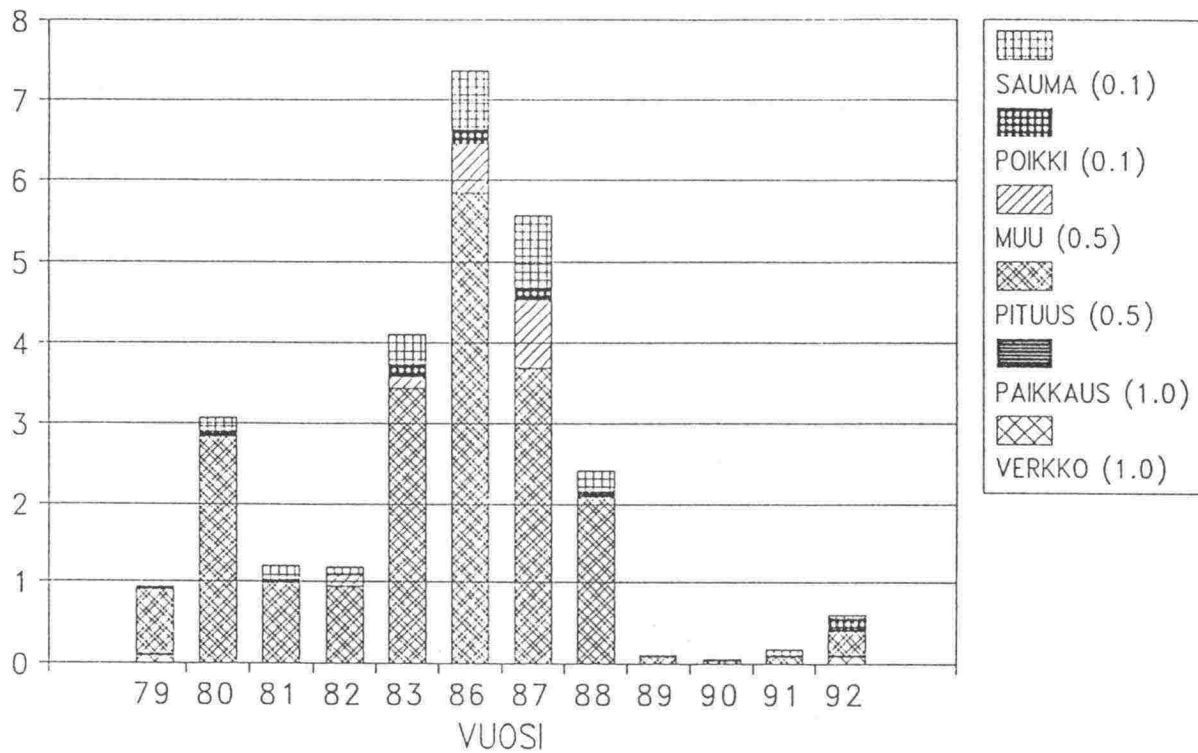


54/9
VAURIOSUMMA (m2)

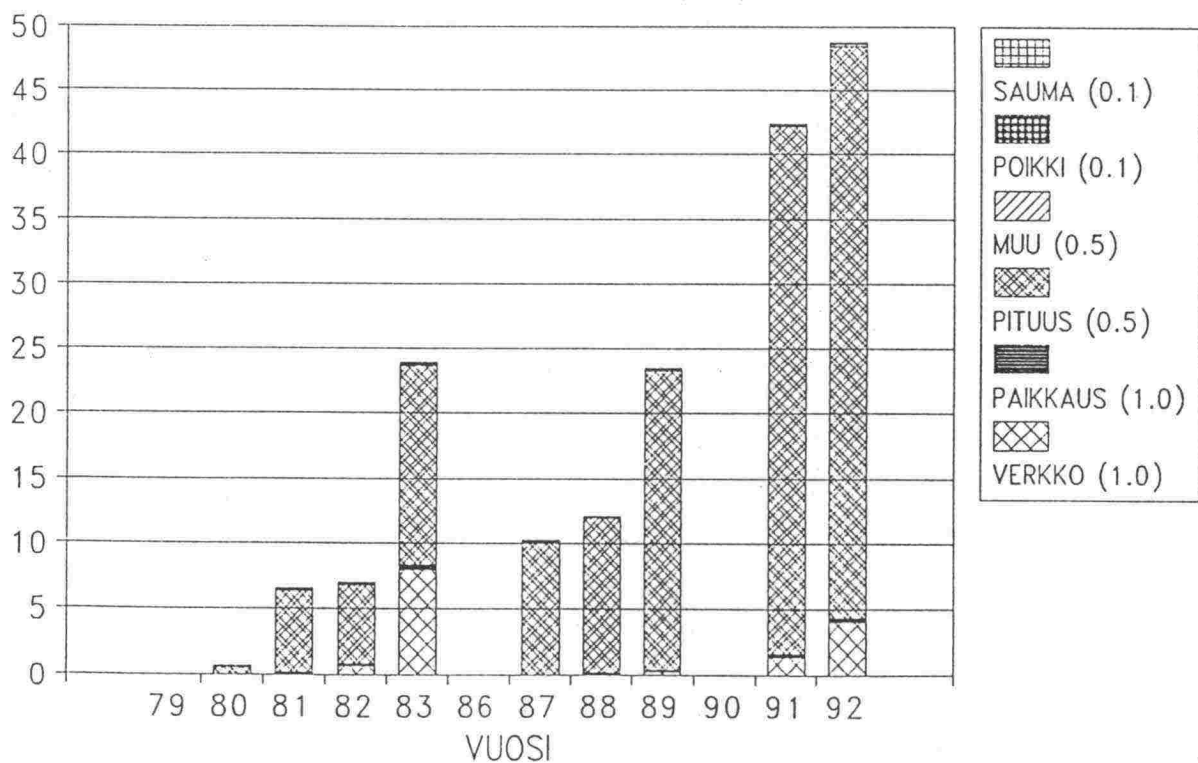


58/5
VAURIOSUMMA (m2)

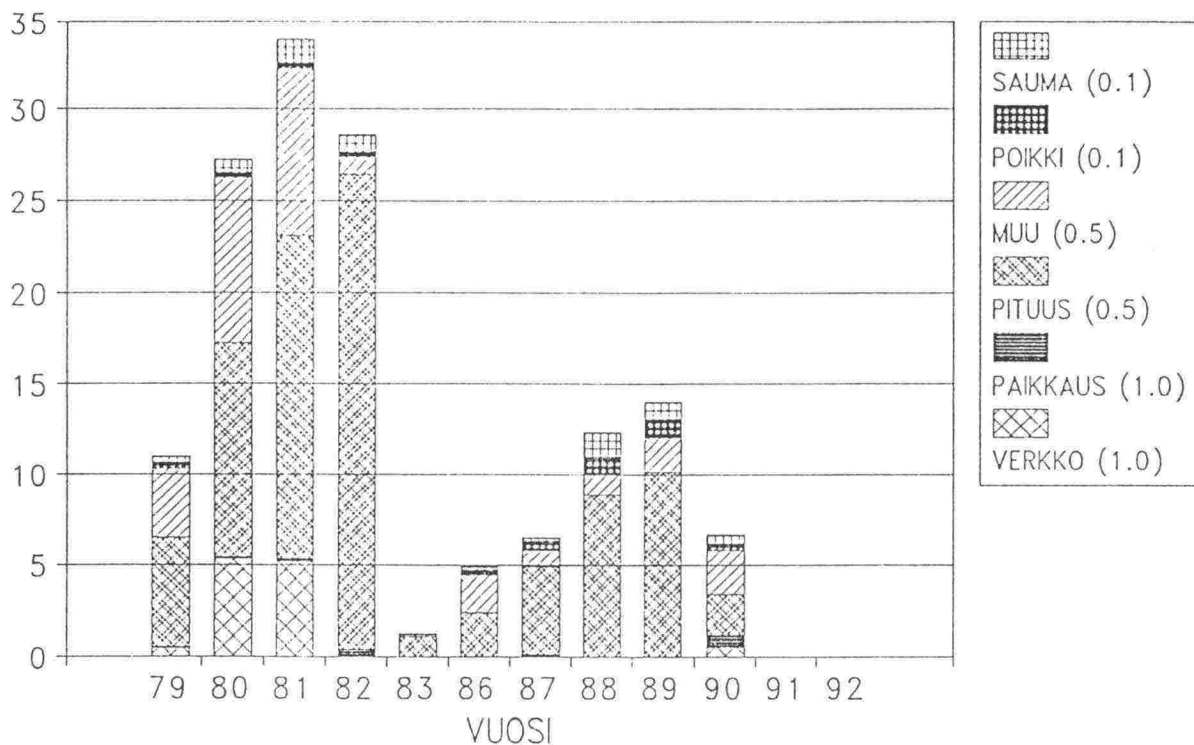
LIITE 2/7



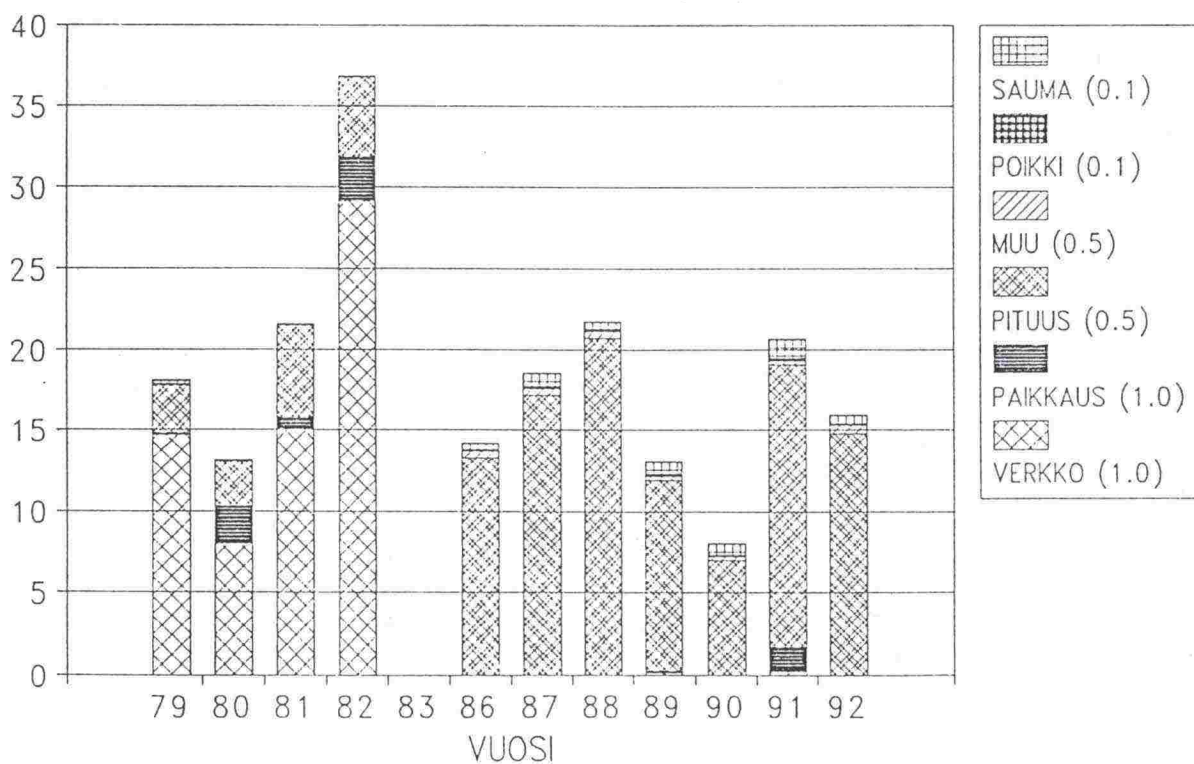
301/6
VAURIOSUMMA (m2)



304/3 VAURIOSUMMA (m2)

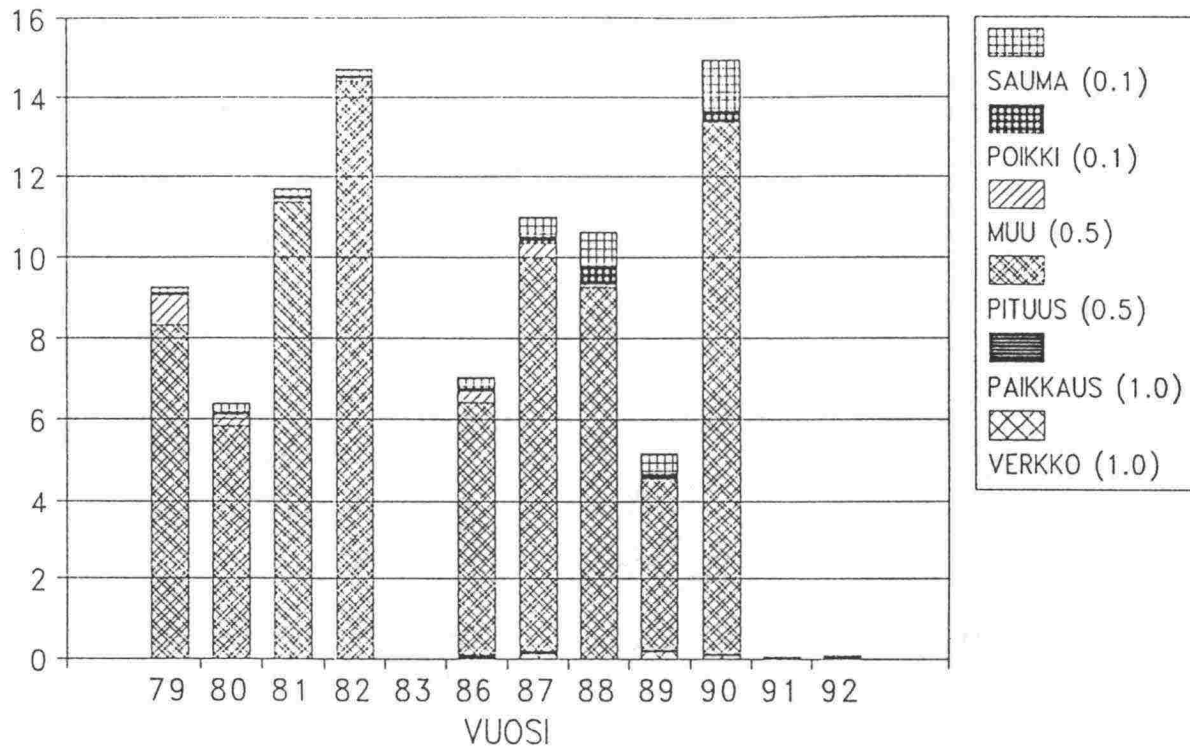


325/2 VAURIOSUMMA (m2)

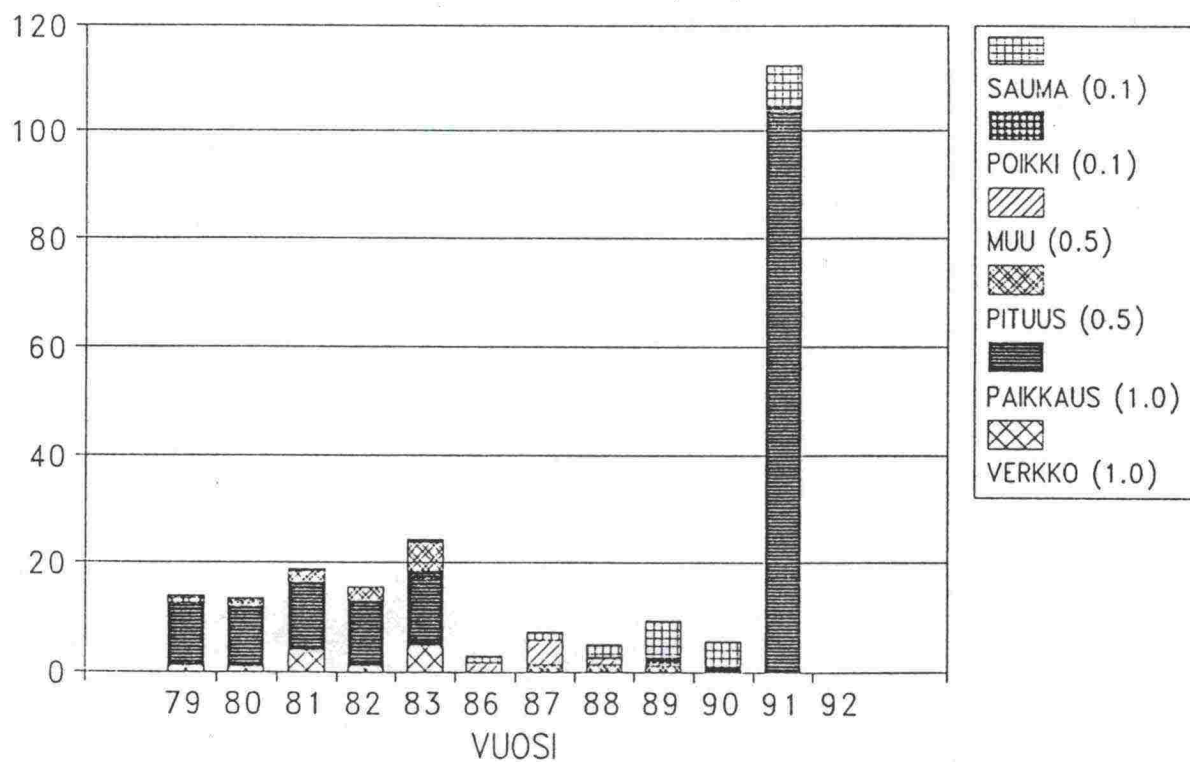


9/310
VAURIOSUMMA (m2)

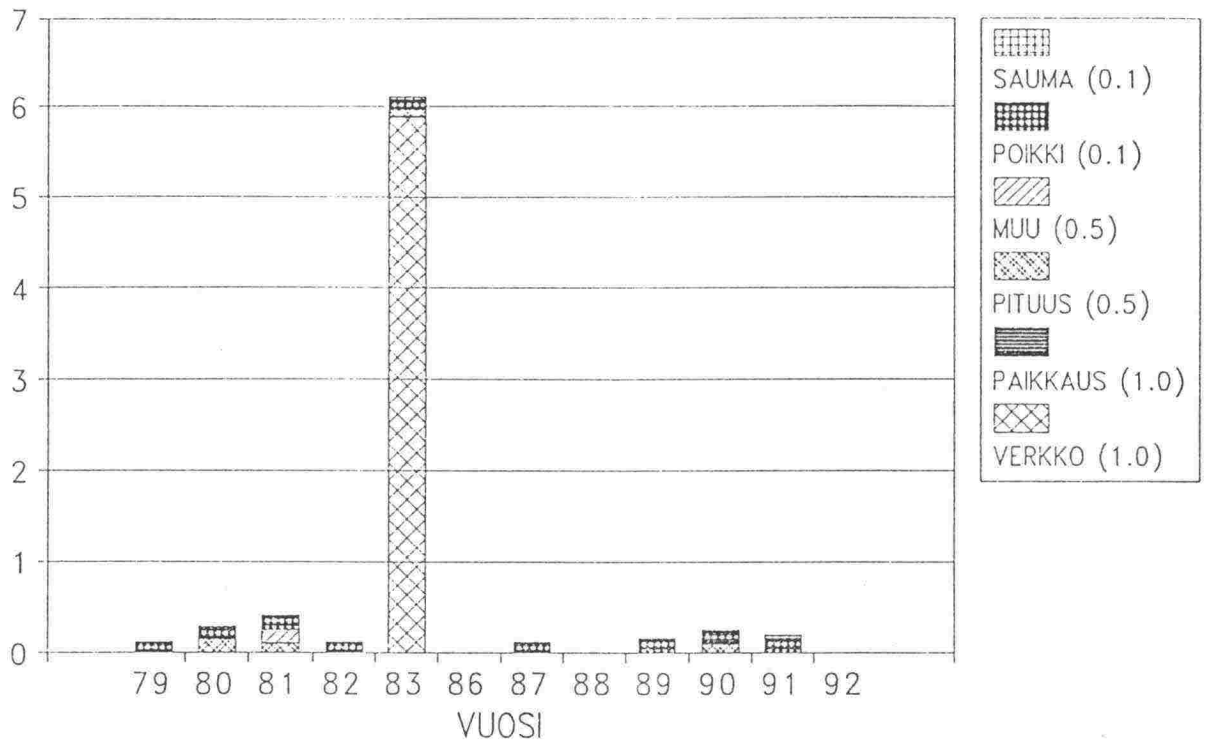
LIITE 2/9



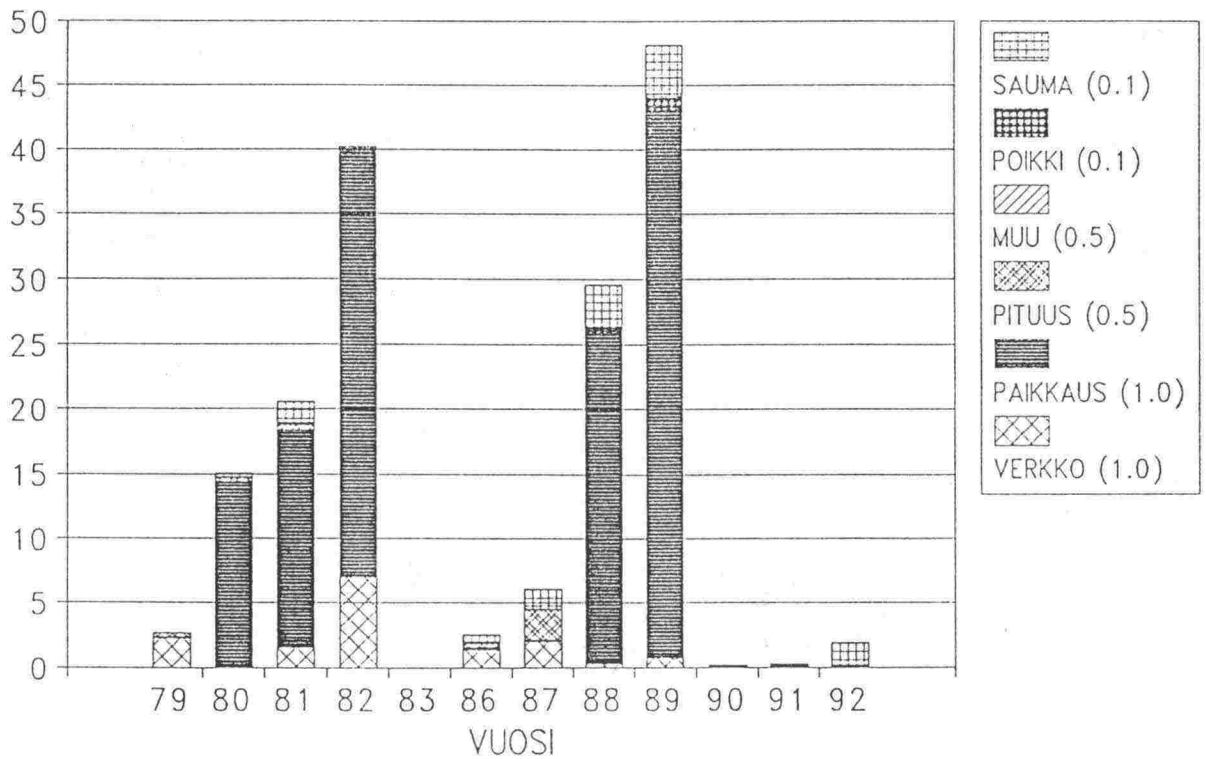
23/222
VAURIOSUMMA (m2)



3/247
VAURIOSUMMA (m2)

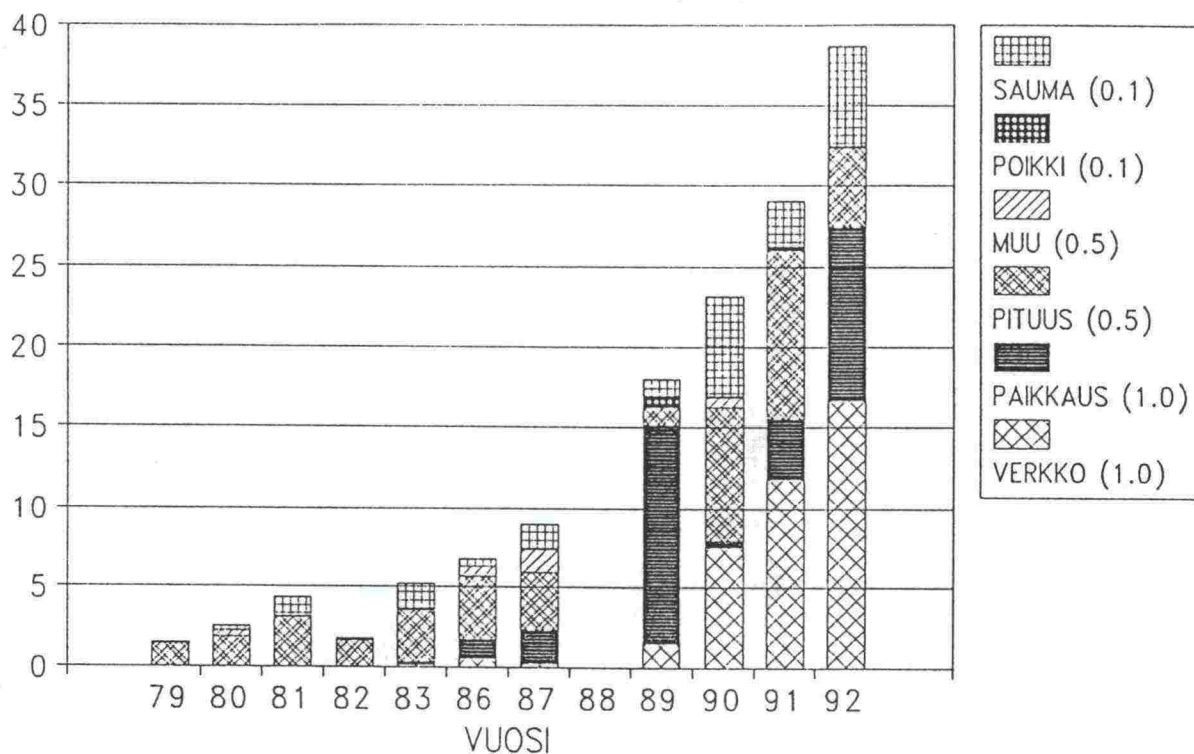


64/2
VAURIOSUMMA (m2)

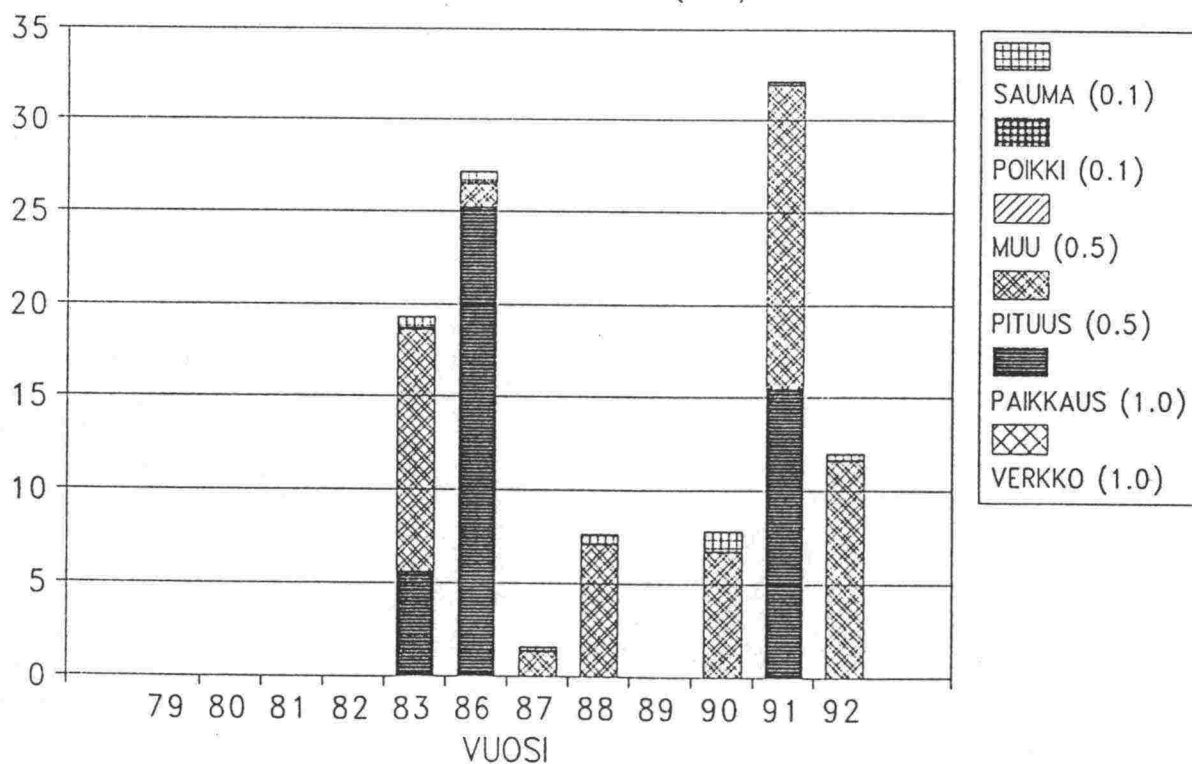


685/4
VAURIOSUMMA (m²)

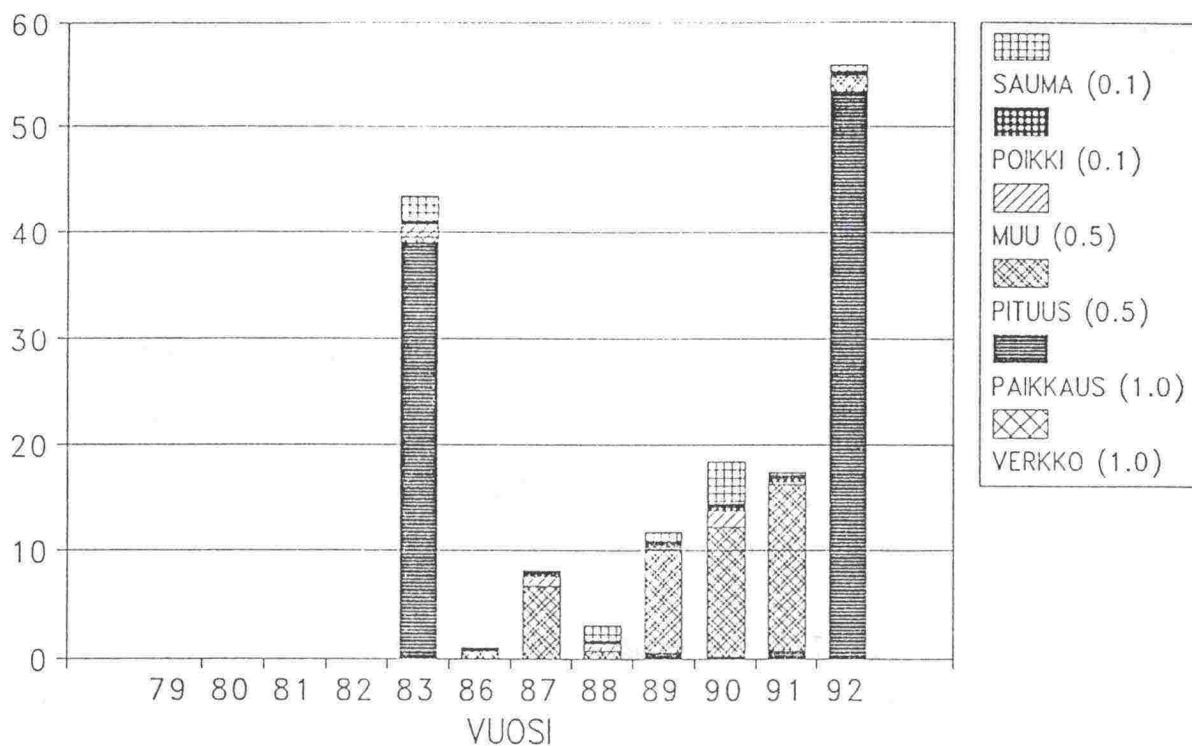
LIITE 2/11



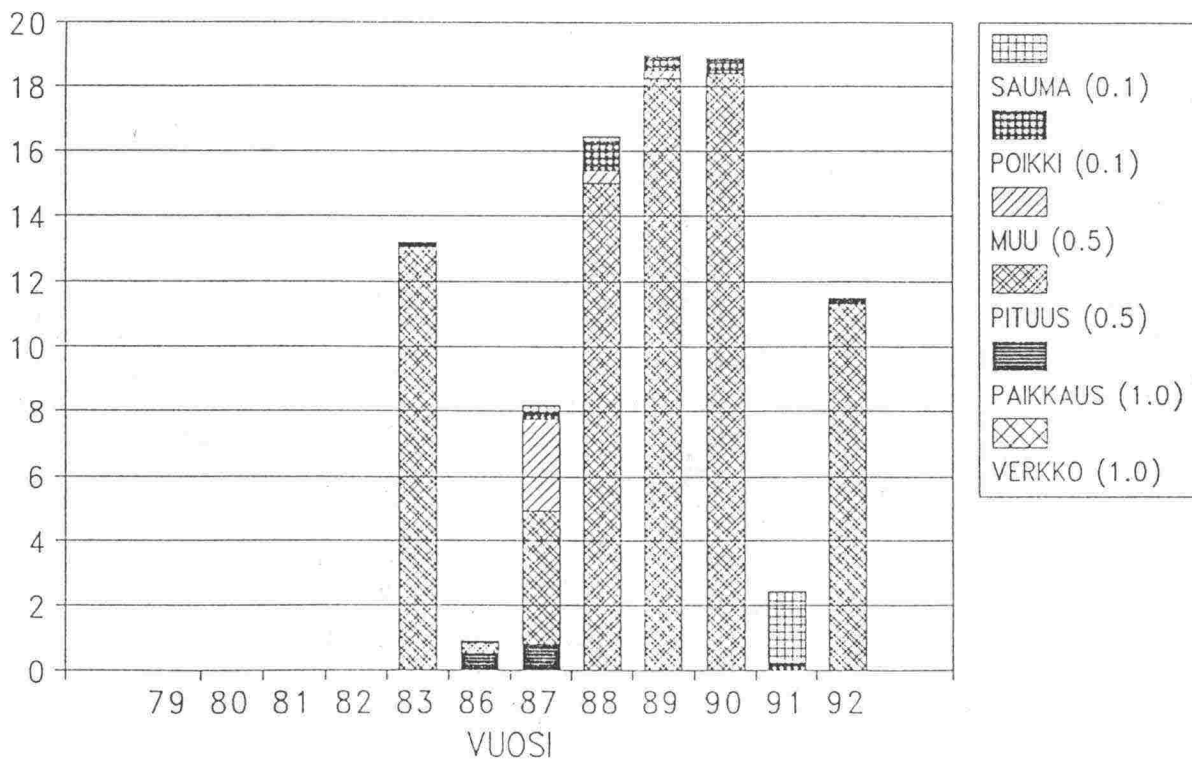
4/356
VAURIOSUMMA (m²)



4 / 414
VAURIOSUMMA (m²)

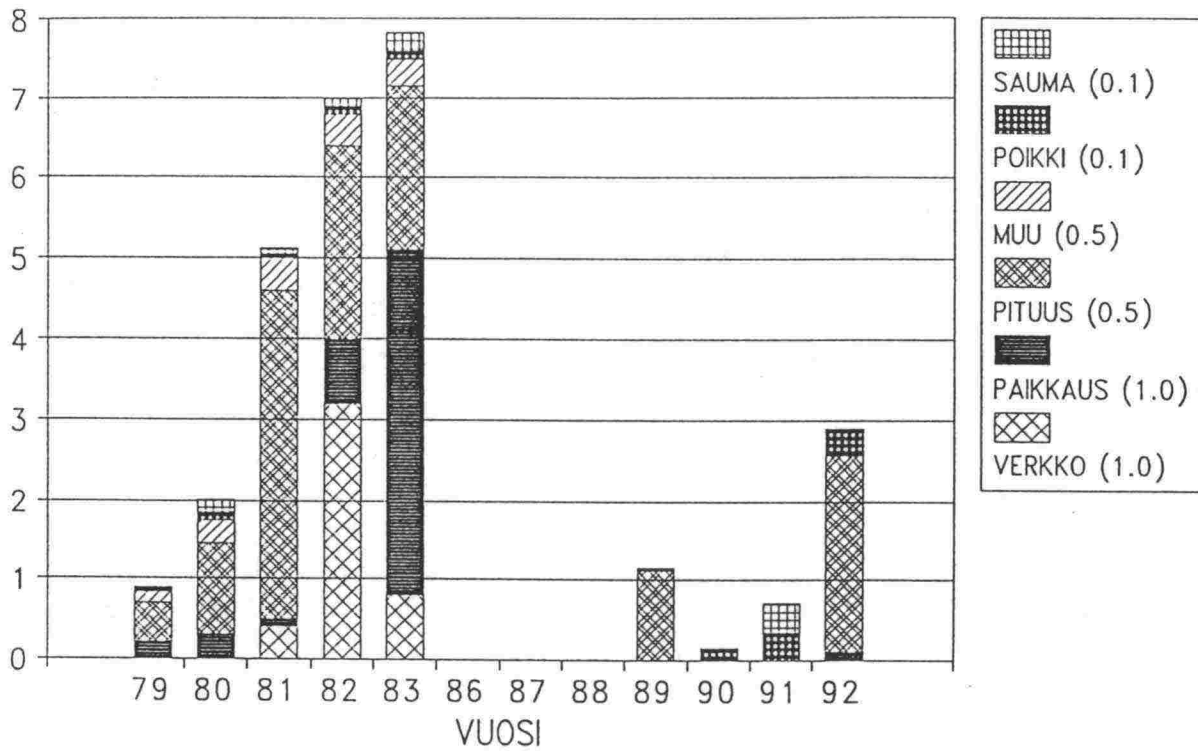


20 / 12
VAURIOSUMMA (m²)



20/31
VAURIOSUMMA (m2)

LIITE 2/13



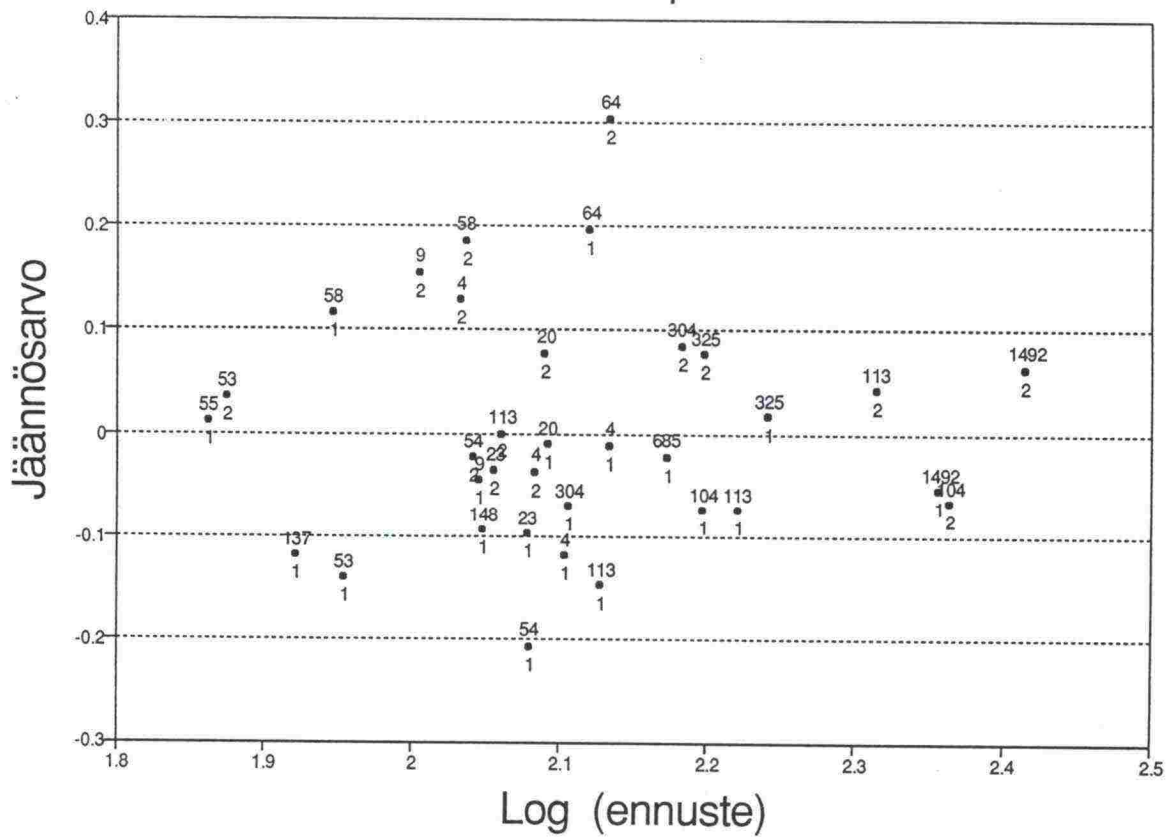
LIITE 3/1. Pudotuspainomittausten tulokset.

kohde		homog. osuuden pituus, m	kerrospaksuudet, h, mm					kantavuus, E, MPa				kohde	
tie	tosa		AB	muut.sit		yht.	mitattu	kerroin		korjattu	tie	tosa	
				kantava	sit.yht.			lt, C					
53	19	500	210	420	900	1320	1530	567	24.8	0.915	620	53	19
55	5	700	140	220	750	970	1110	478	34	0.847	564	55	5
104	6	600	110	500	700	1200	1310	474	32.7	0.892	531	104	6
113	1	400	170	150	310	460	630	448	21.1	0.984	455	113	1
113	9	700	110	200	550	750	860	339	25	0.956	355	113	9
137	6	300	280	500	950	1450	1730	674	18	1.052	641	137	6
148	7	300	160	700	600	1300	1460	550	33	0.836	658	148	7
1492	2	400	150	220	210	430	580	161	30	0.880	183	1492	2
54	9	400	200	300	599	899	1099	483	28.4	0.863	560	54	9
58	5	700	133	99	650	749	882	414	9.7	1.122	369	58	5
304	3	100	158	201	1100	1301	1459	567	21.8	0.976	581	304	3
325	2	200	77	150	800	950	1027	328	19.9	1.001	328	325	2
9	310	500	160	201	749	950	1110	382	36	0.802	476	9	310
23	222	300	90	150	300	450	540	475	30	0.932	510	23	222
3	247	400	295	300	600	900	1195	436	16	1.112	392	3	247
64	2	700	144	200	950	1150	1294	359	18	1.025	350	64	2
685	4	900	94	200	950	1150	1244	312	27.6	0.945	330	685	4
4	356	300	197	250	780	1030	1227	413	19	1.017	406	4	356
4	414	300	118	300	800	1100	1218	449	26.7	0.937	479	4	414
20	12	300	135	530	880	1410	1545	486	22	0.977	497	20	12
keskiarvo		450	157	290	706	996	1153	440	24.7	0.954	464		
otoskeskihajonta		206	58	159	236	309	328	111	6.9	0.087	124		
variaatiokerroin		45.9	36.8	54.8	33.4	31.1	28.4	25.3	27.9	9.2	26.7		
pienin arvo		100	77	99	210	430	540	161	9.7	0.802	183		
suurin arvo		900	295	700	1100	1450	1730	674	36	1.122	658		

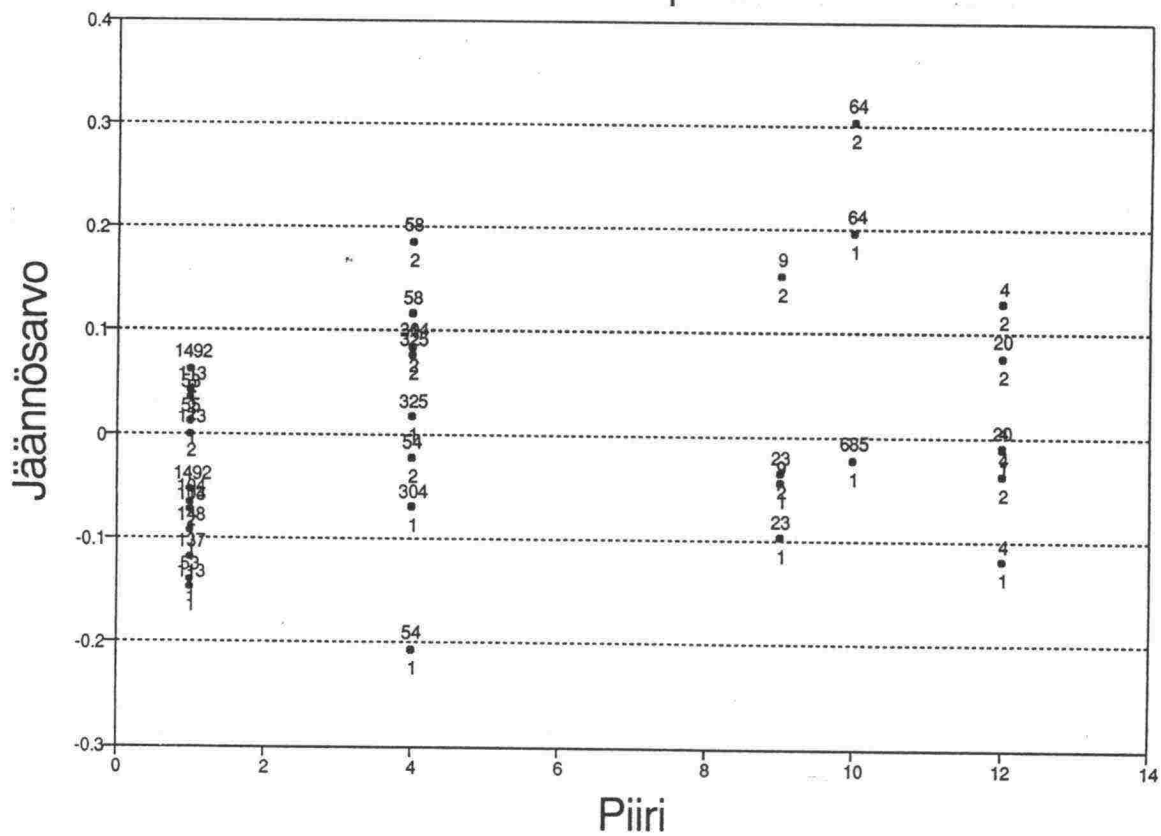
LIITE 3/2. Pudotuspainomittausten tulokset.

kohde		rakennekerrosten muodonmuutosmoduulit, E, MPa								variaatiokerroin, cv, %				kohde	
tie	tosa	AB	kerroin		kantava		pohjamaa		AB	kantava		pohjamaa		tie	tosa
			lt, C	korjattu		muut.sit		muut.sit			muut.sit				
53	19	3074	24.8	1.332	4093	417	111	111	20.5	25.2	18.2	10.5	53	19	
55	5	1685	34	2.933	4943	621	251	115	20	20.2	28.6	7.5	55	5	
104	6	1351	32.7	2.611	3528	350	567	87	0	0	22.2	16.2	104	6	
113	1	2959	21.1	0.998	2954	297	574	60	33.2	55.3	12.2	18.4	113	1	
113	9	3736	25	1.353	5056	200	341	71	19.6	19.1	31.6	16.1	113	9	
137	6	2955	18	0.798	2358	174	372	89	17.5	32	54.6	16.1	137	6	
148	7	2048	33	2.682	5492	350	461	76	0	0	57.4	31.6	148	7	
1492	2	1997	30	2.059	4113	69	87	29	40.5	55.3	79.6	14.7	1492	2	
54	9	3276	28.4	1.795	5881	250	274	74	28.8	32.4	43	16.2	54	9	
58	5	6900	9.7	0.484	3339	296	188	63	15.6	64.4	17.7	10.3	58	5	
304	3	5131	21.8	1.052	5400	272	230	65	17.4	45.1	18.4	24.1	304	3	
325	2	3966	19.9	0.913	3623	365	178	158	46	25.1	22.6	52.4	325	2	
9	310	1695	36	3.516	5960	276	203	79	30.1	33.8	15.8	19.2	9	310	
23	222	1959	30	2.059	4034	617	323	244	45.5	25.5	55.3	27.5	23	222	
3	247	2908	16	0.698	2029	80	121	73	28.6	54.2	62	17.4	3	247	
64	2	3507	18	0.798	2799	190	149	60	23.4	38.9	26.5	37.5	64	2	
685	4	3331	27.6	1.678	5588	282	151	124	30.9	21.7	27.6	19.4	685	4	
4	356	2233	19	0.856	1912	143	614	61	25.4	38.1	60	30.1	4	356	
4	414	2255	26.7	1.556	3509	565	81	203	0	21.6	27.5	14.2	4	414	
20	12	3747	22	1.069	4004	382	146	82	13.9	13.1	18.7	7.6	20	12	
keskiarvo		3036	24.7	1.562	4031	310	271	96	26.9	34.5	35.0	20.4			
otoskeskihajonta		1308	6.9	0.844	1269	157	168	52	cv=0: moduulin arvo						
variaatiokerroin		43.1	27.9	54.0	31.5	50.8	62.0	54.2	kiinnitetty						
pienin arvo		1351	9.7	0.484	1912	69	81	29	13.9	13.1	12.2	7.5			
suurin arvo		6900	36	3.516	5960	621	614	244	46	64.4	79.6	52.4			

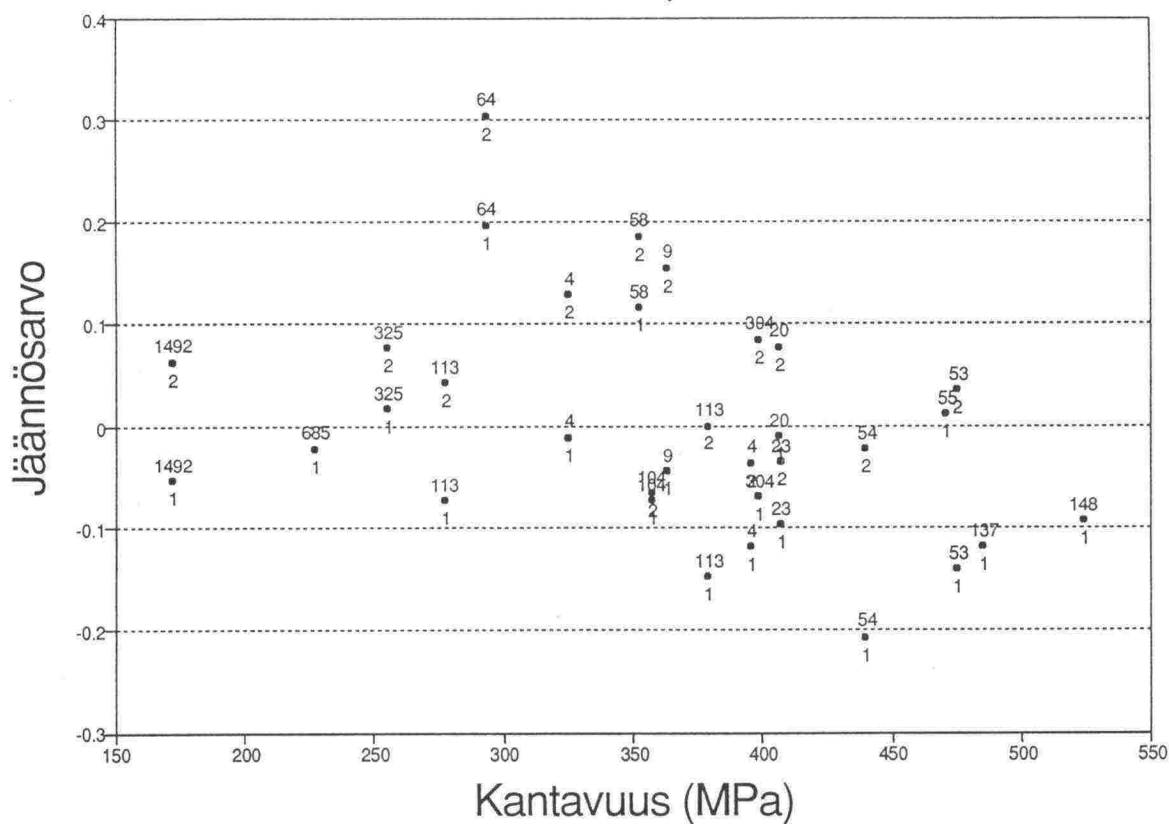
Asfaltin alapinta



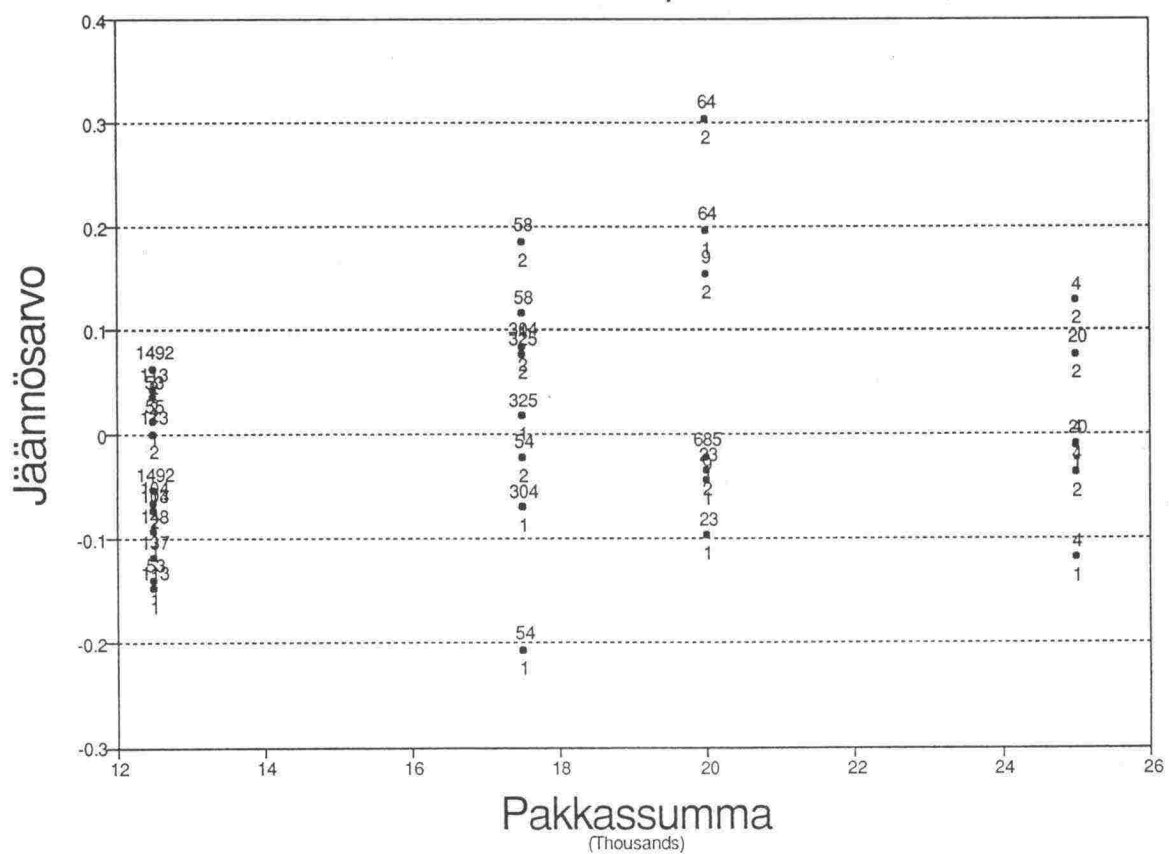
asfaltin alapinta



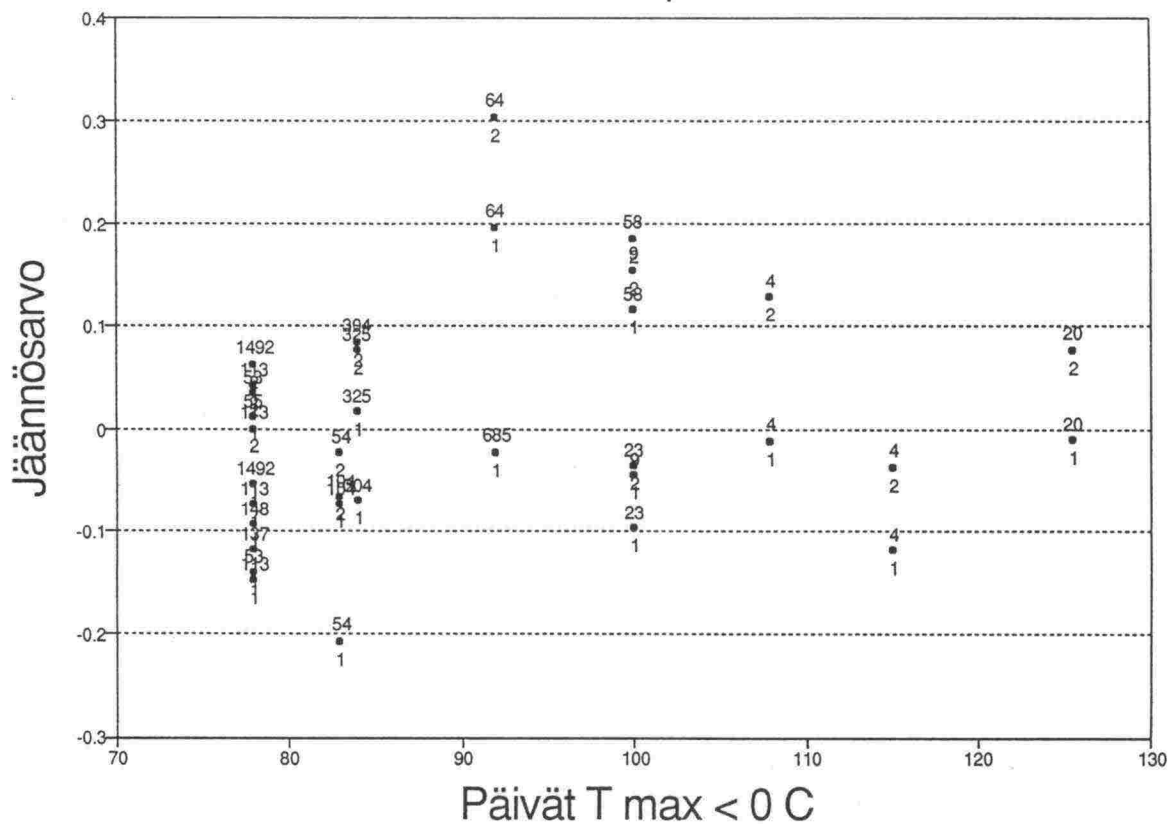
Asfaltin alapinta



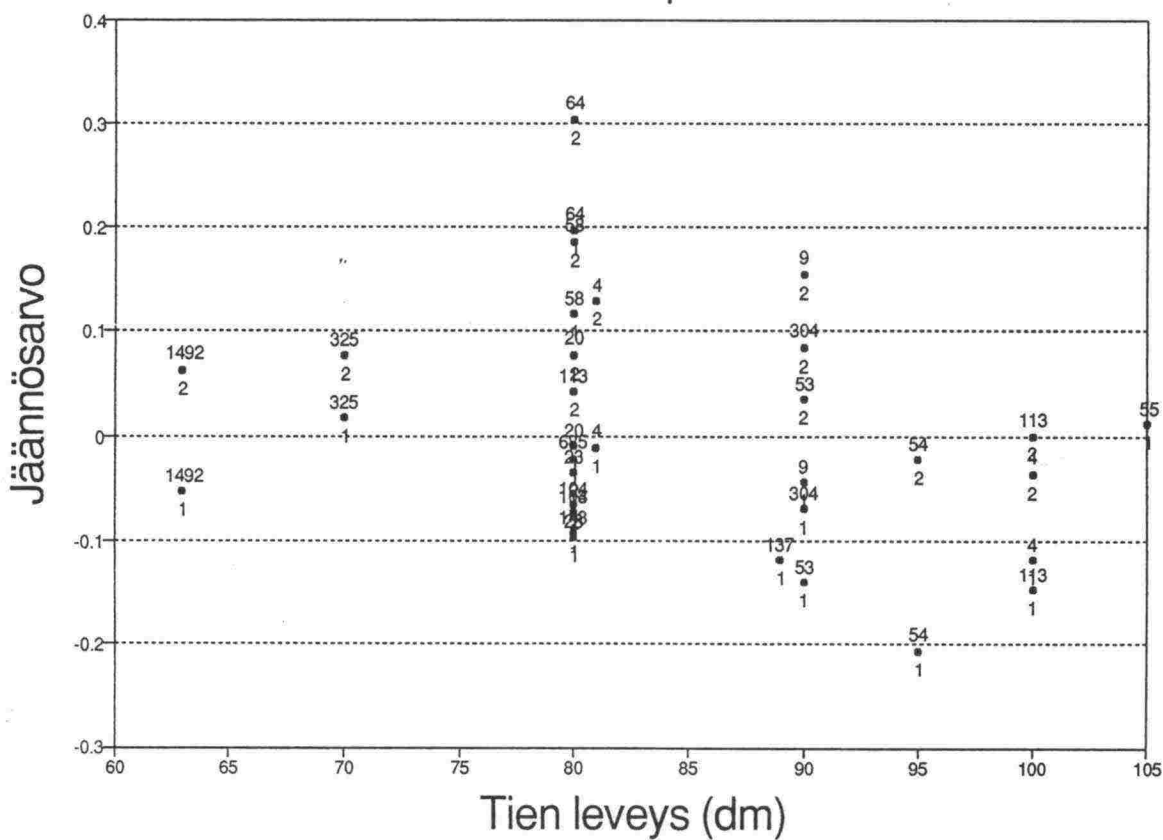
Asfaltin alapinta



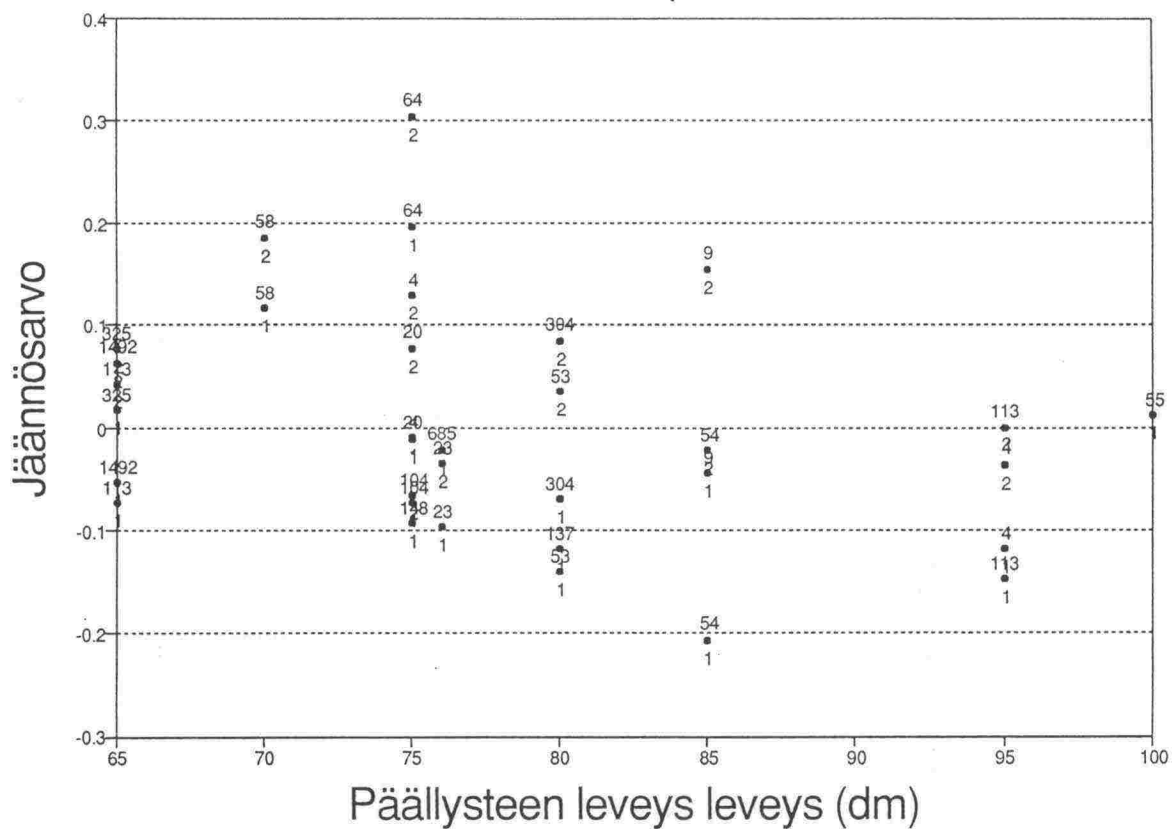
Asfaltin alapinta



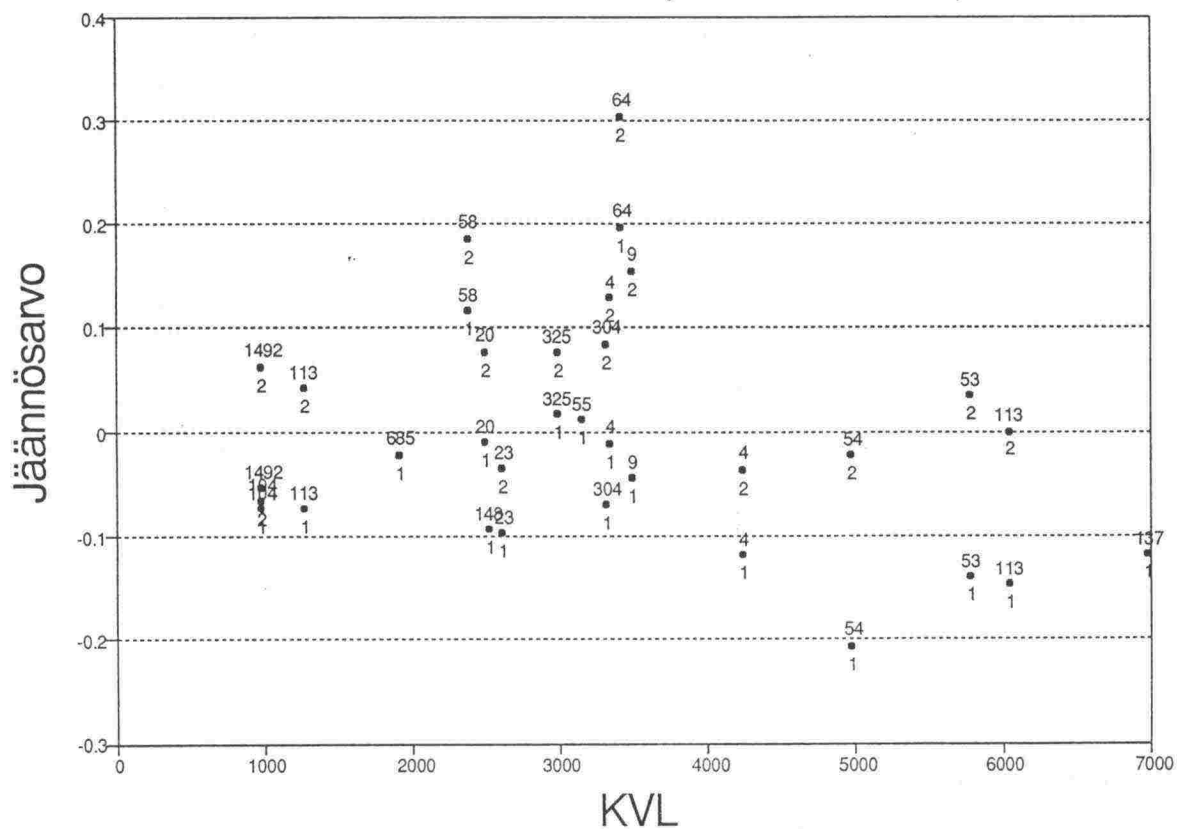
Asfaltin alapinta



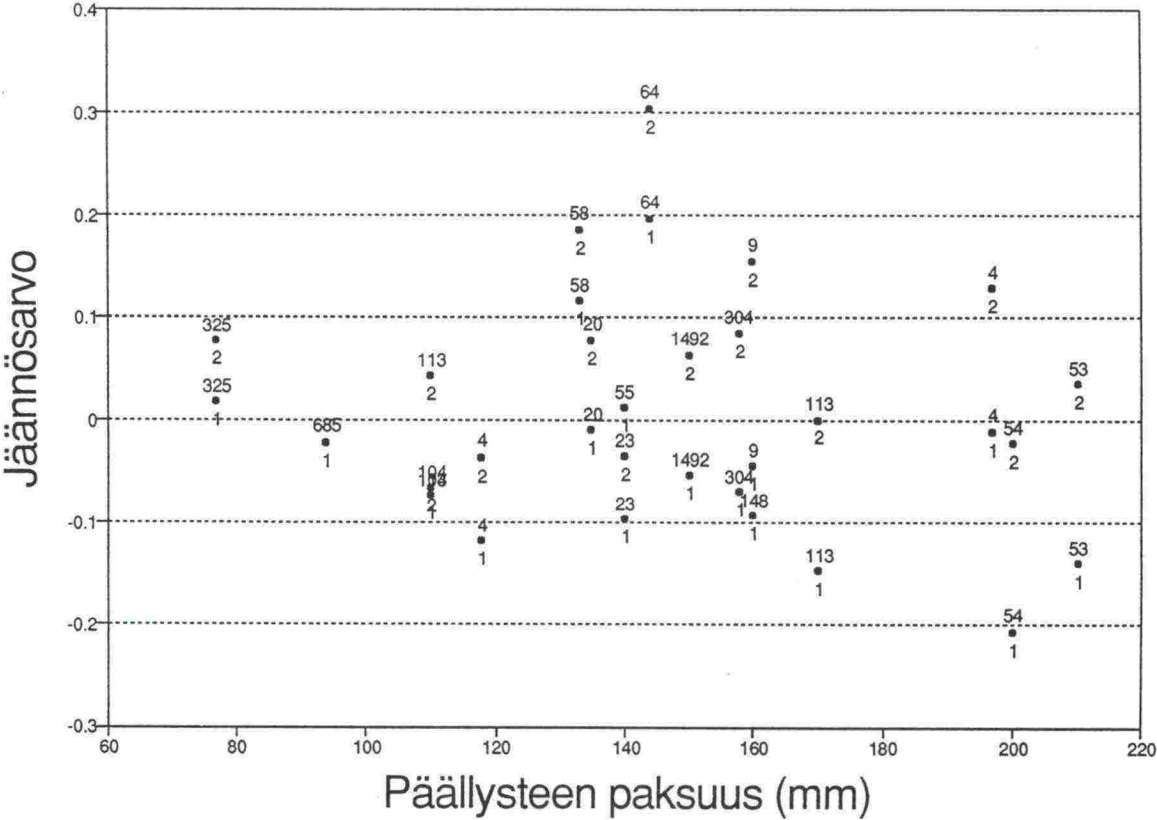
Asfaltin alapinta



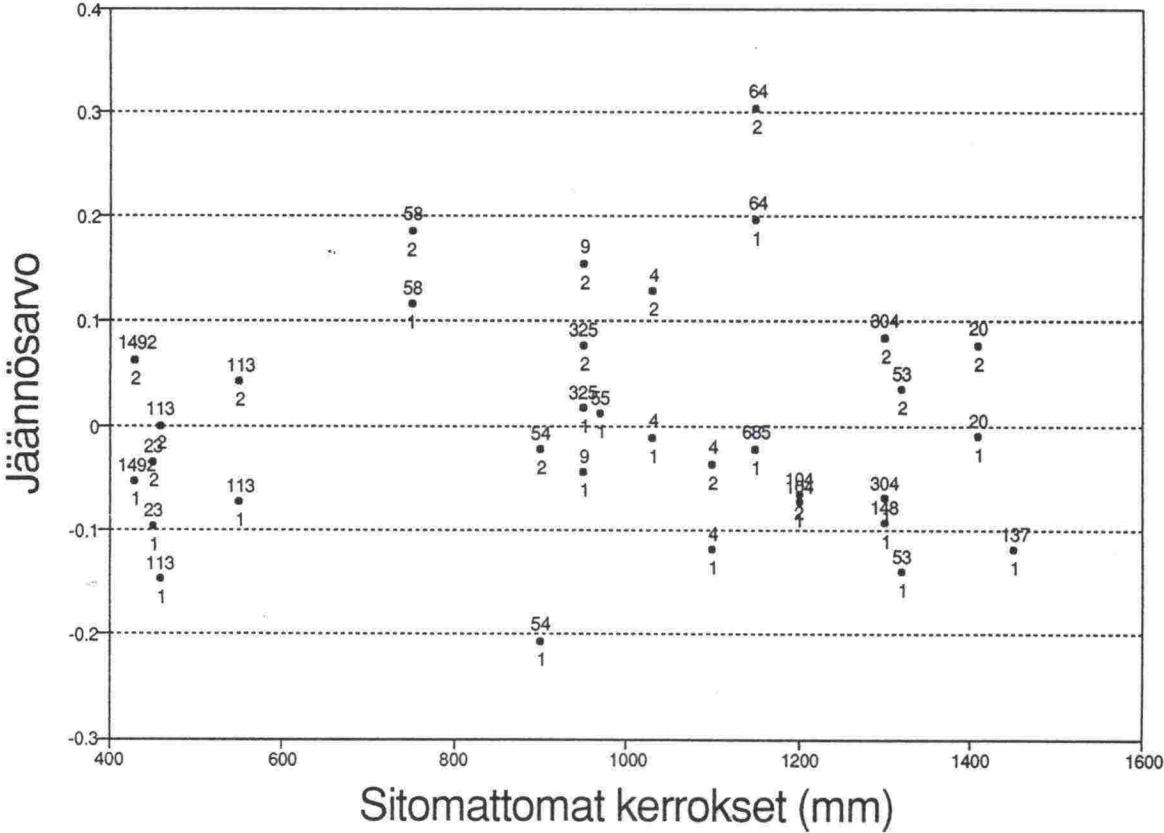
Asfaltin alapinta



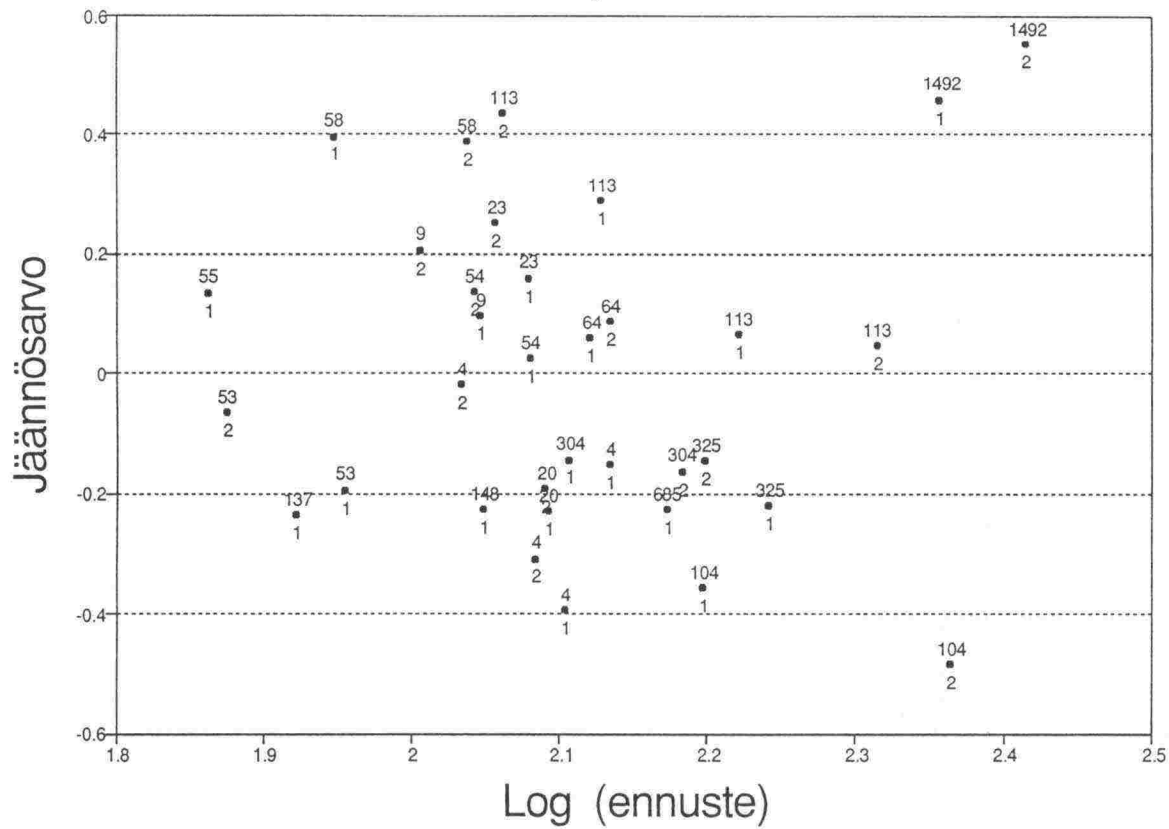
Asfaltin alapinta



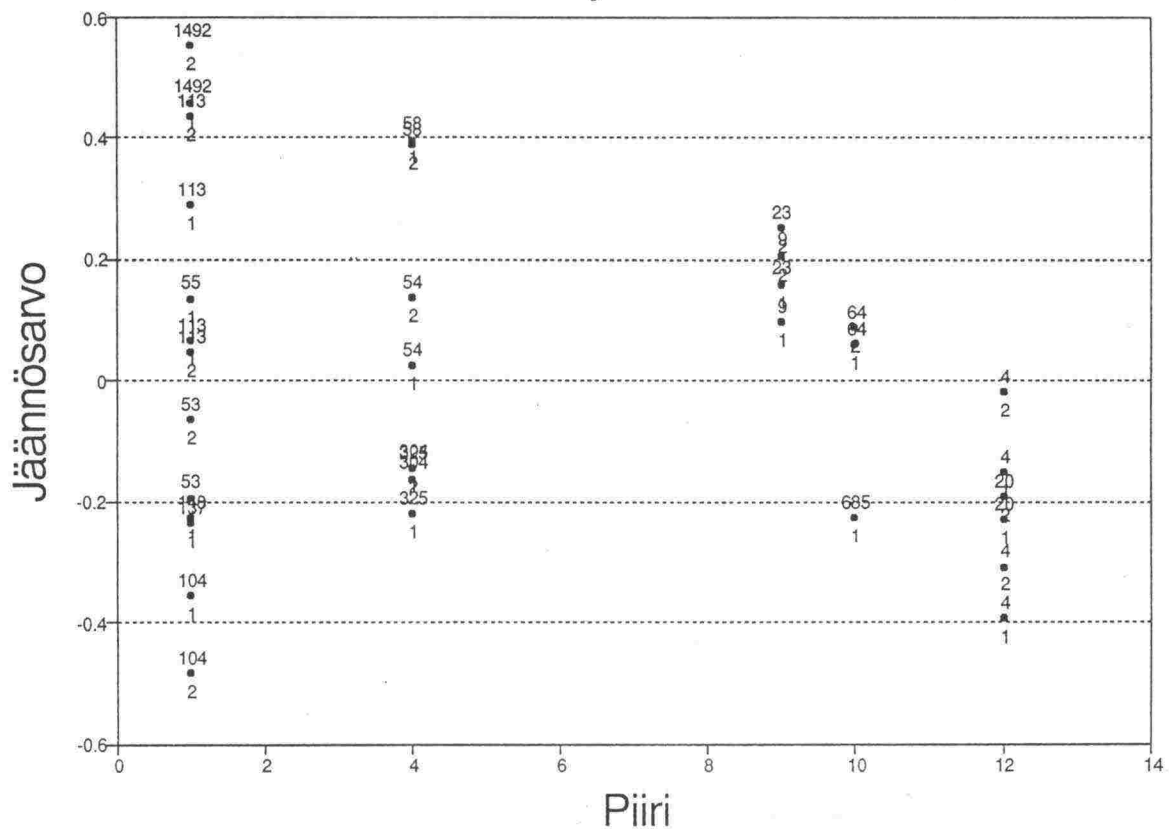
Asfaltin alapinta



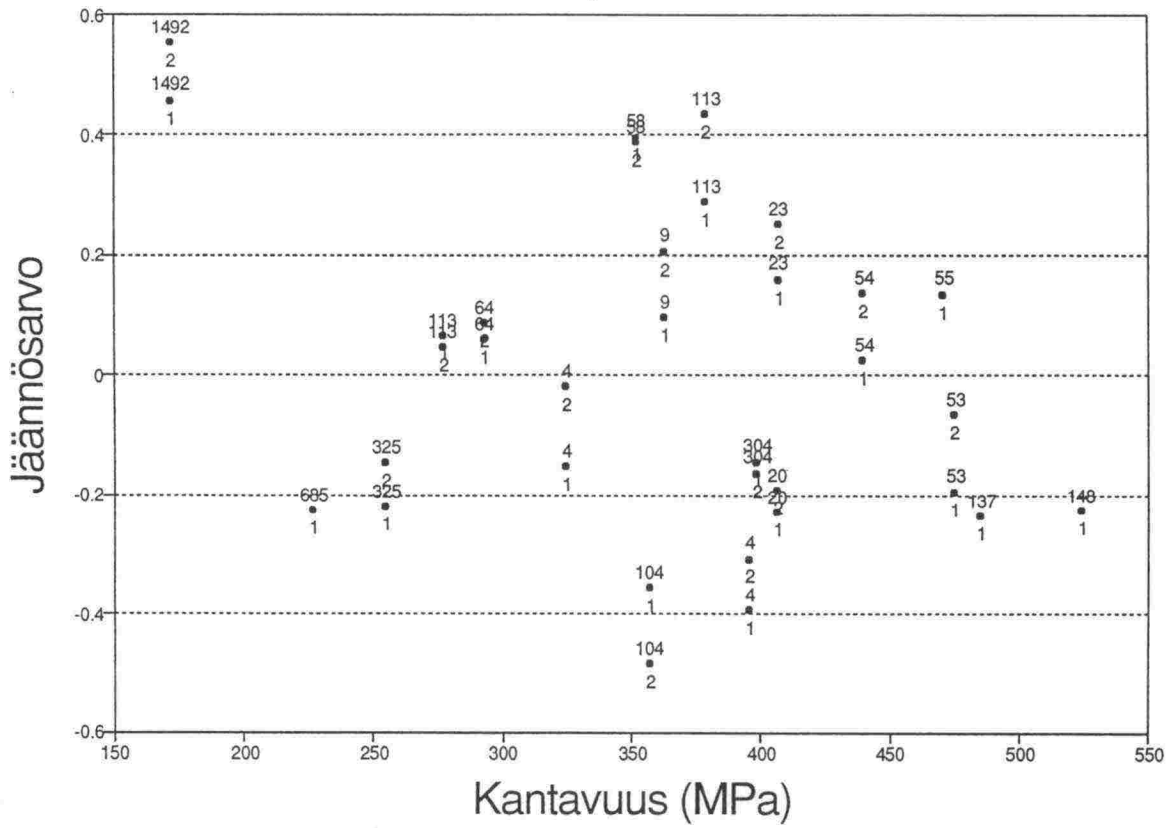
Pohjamaa



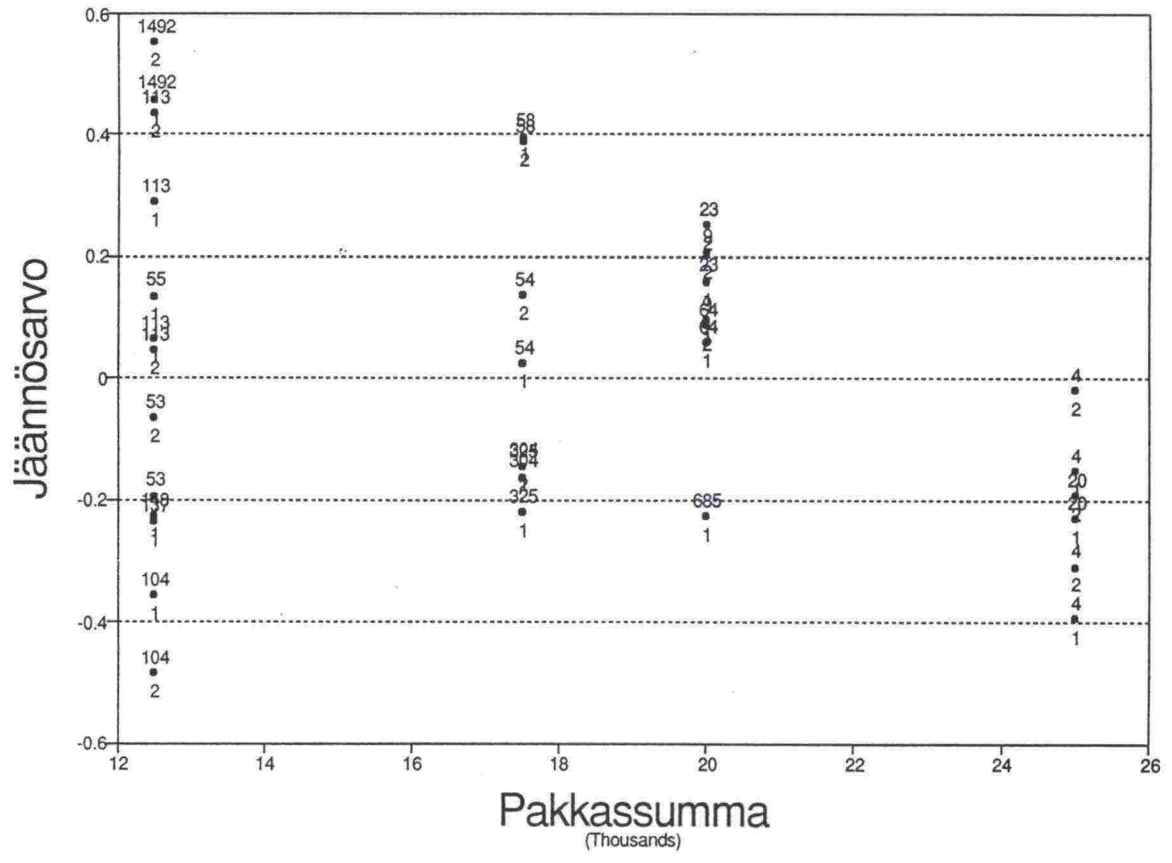
Pohjamaa



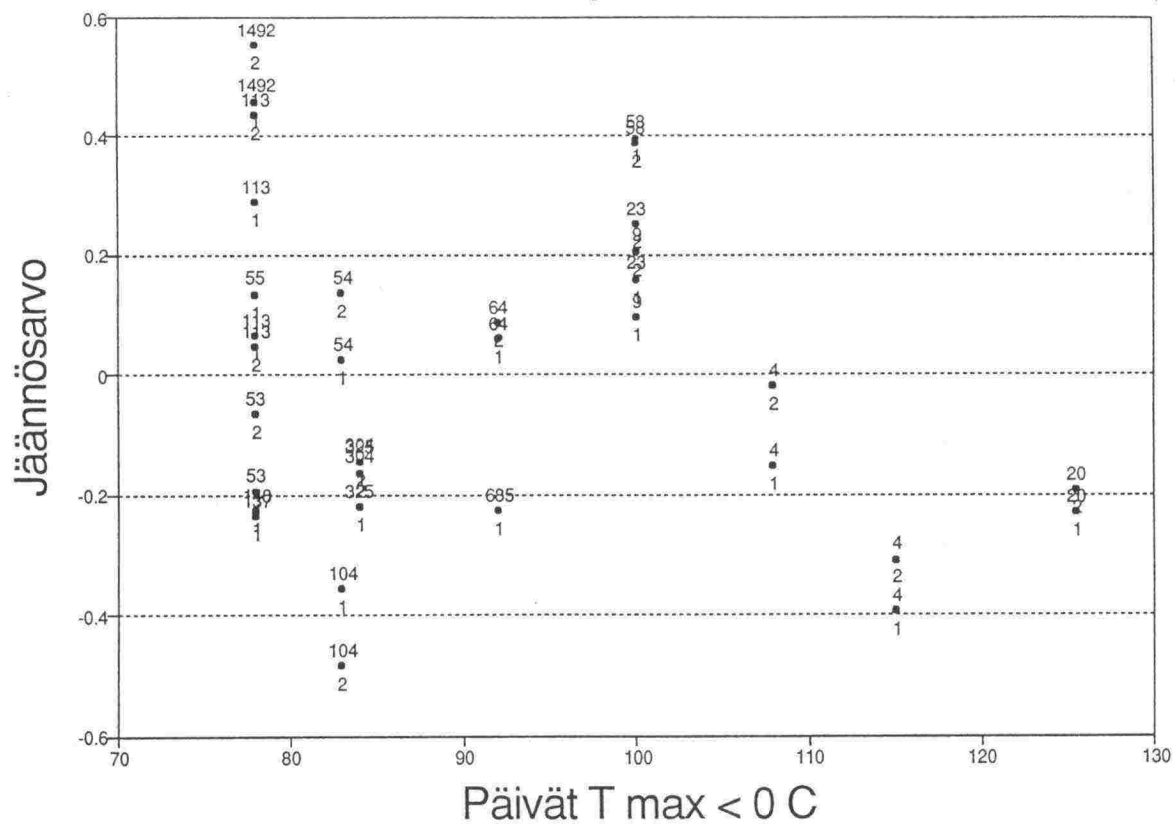
Pohjamaa



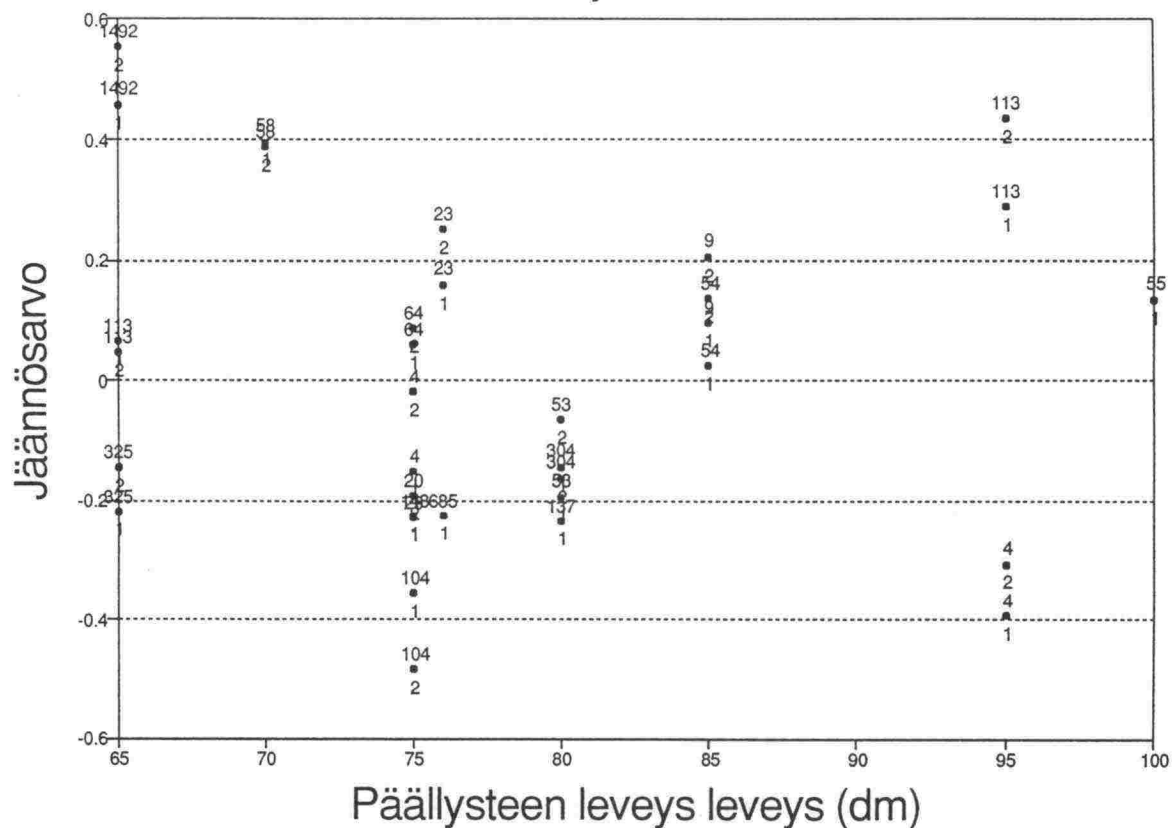
Pohjamaa



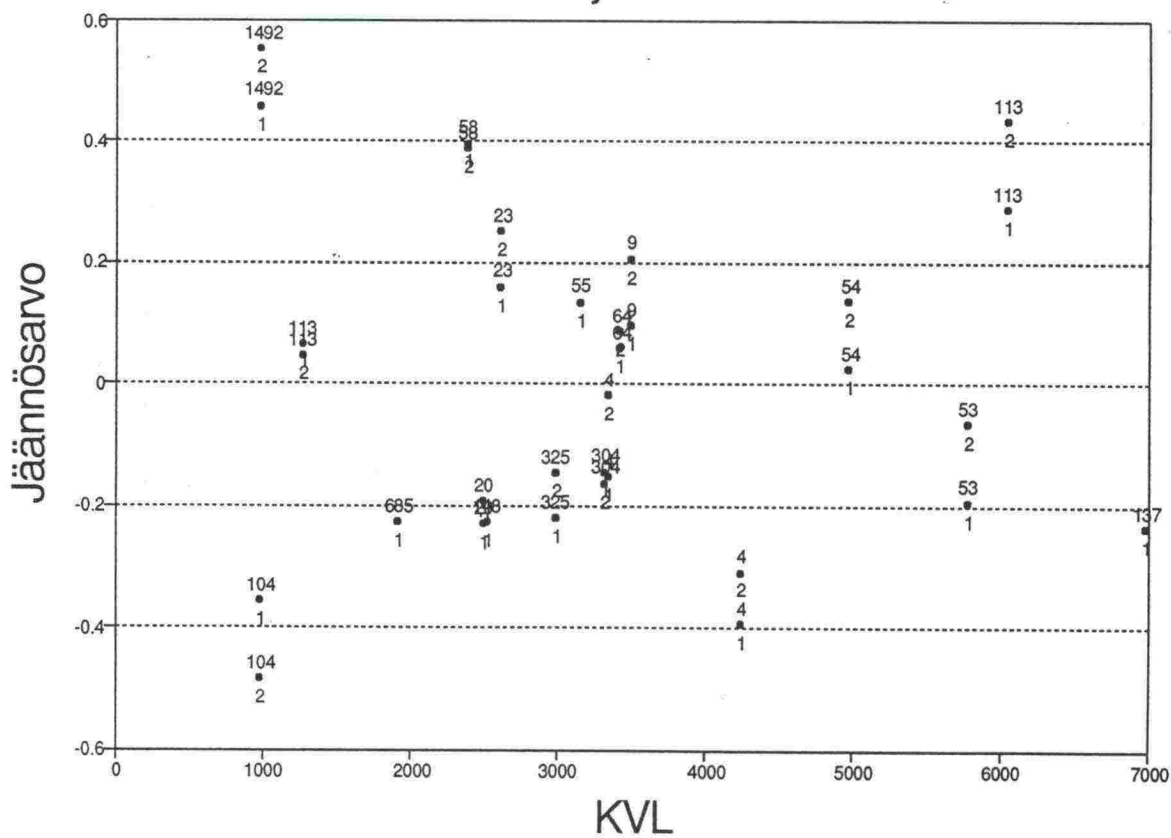
Pohjamaa

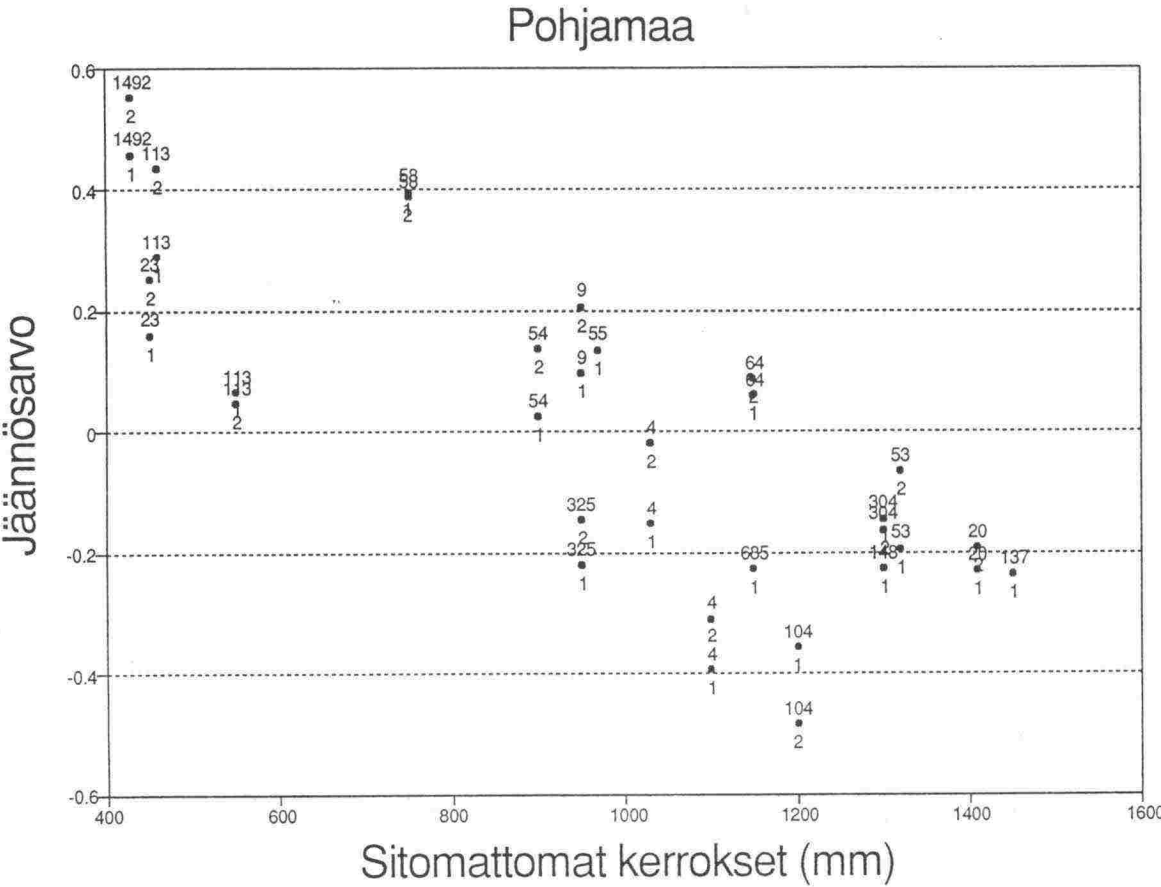
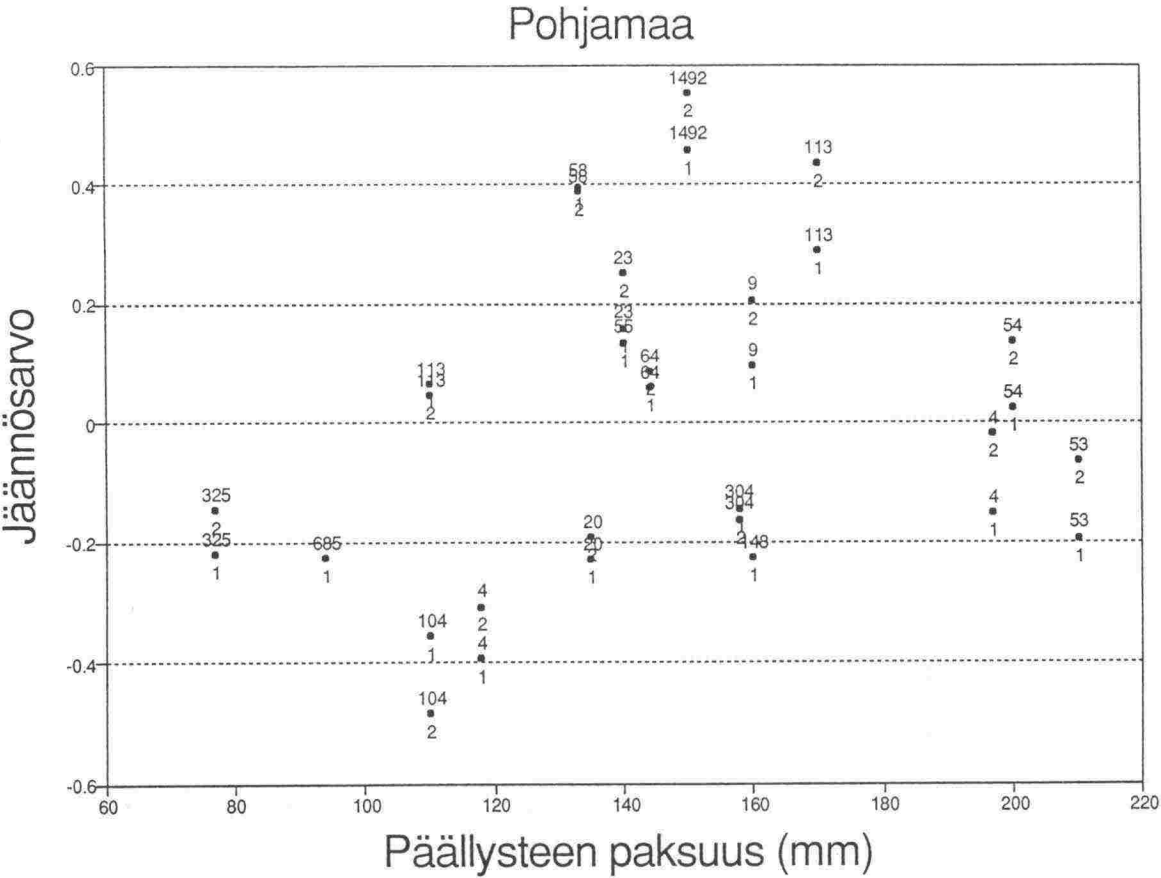


Pohjamaa



Pohjamaa

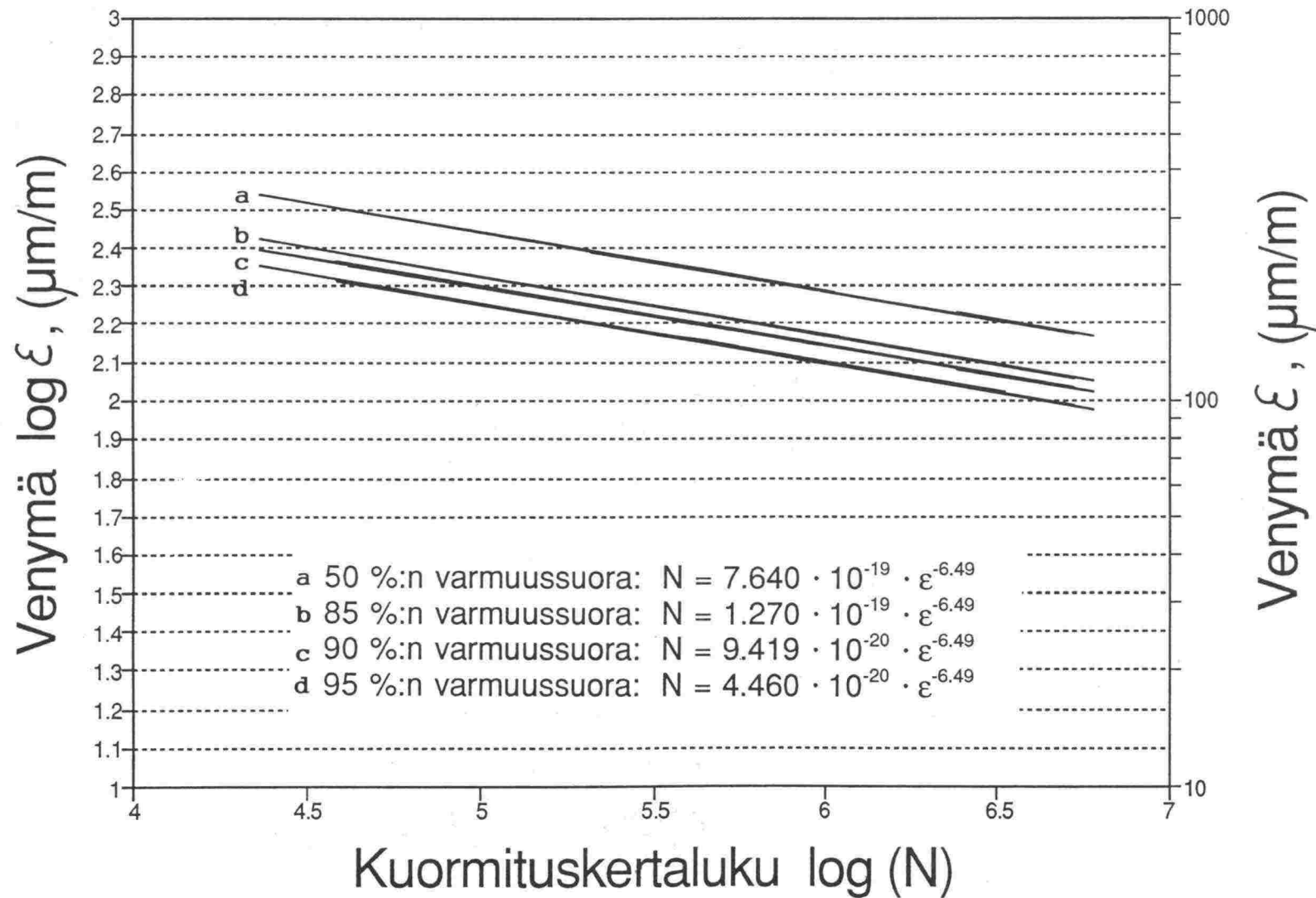




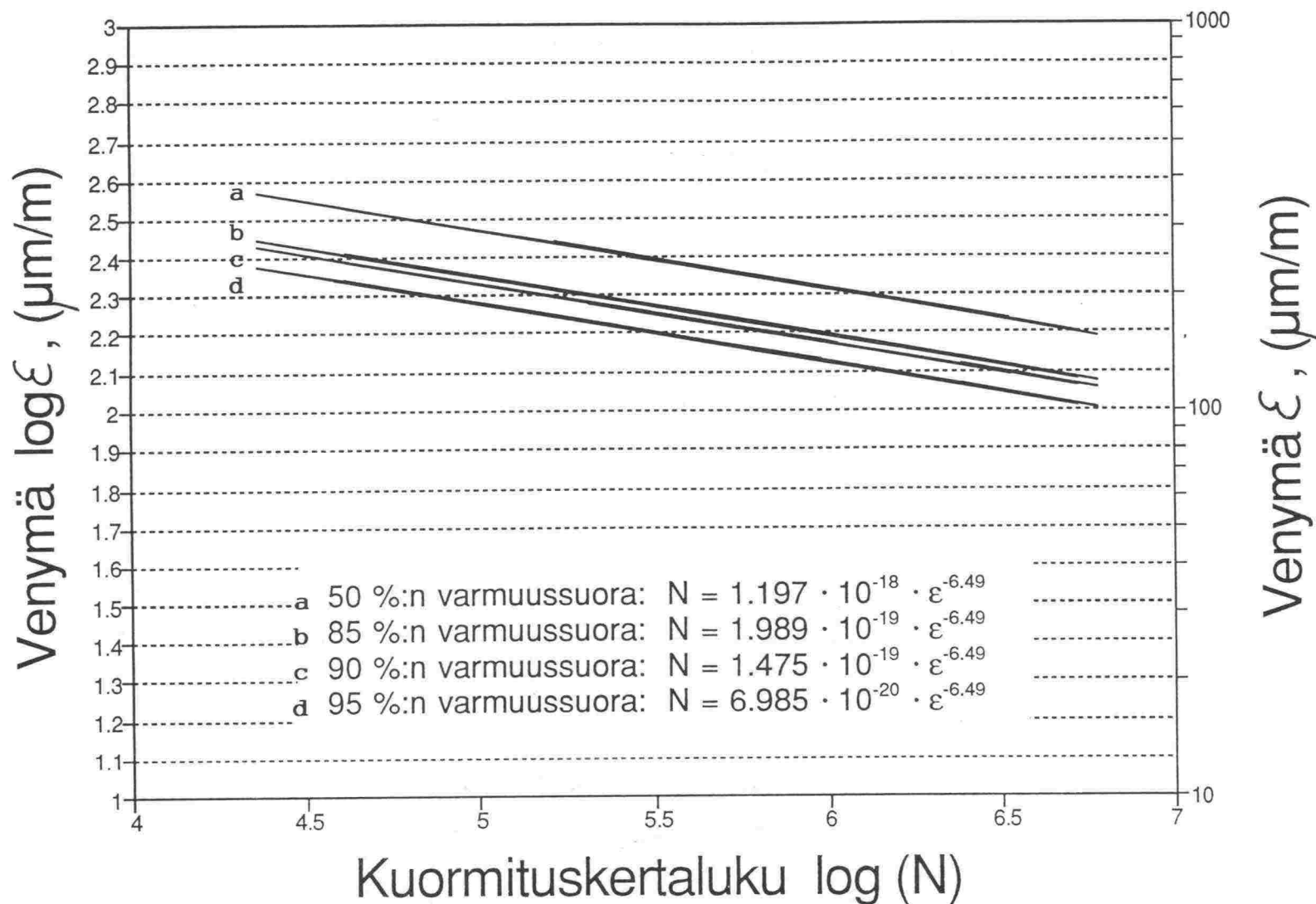
KOHDE	Rakennekerrosmoduulit, E, MPa				Rakennekerrosmoduulit, E, MPa				Rakennekerrosmoduulit, E, MPa				Rakennekerrosmoduulit, E, MPa				kerrospaksuudet, h, mm					
	KEVÄT				KESÄ1				KESÄ2				SYKSY				AB	kantava	muut sit.			
	AB	kantava	muut sit.	pohjamaa	AB	kantava	muut sit.	pohjamaa	AB	kantava	muut sit.	pohjamaa	AB	kantava	muut sit.	pohjamaa						
53	3000	255	80	20	2000	300	100	60	1000	300	100	60	4000	278	90	50	210	420	900			
58	3500	213	120	30	2500	250	150	60	1000	250	150	60	5000	231	135	50	133	100	650			
64	3000	170	80	20	2000	200	100	60	1000	200	100	60	4000	185	90	50	144	200	950			
4	3000	298	64	30	2000	350	80	60	1000	350	80	60	4000	324	72	50	118	300	800			
10.5-31.5., 3 vk, +15 C				n. 3 kk,+20 C				5..8 vrk, +30 C				n. 3 kk, +5 C										
liikennemäärät																						
vuosi	kevät			osuus, %	kesä1			osuus, %	kesä2			osuus, %	syksy			osuus, %	talvi			osuus, %	muut kuin talvi	osuus, %
53	286755	16544		5.77	89213			31.11	6372			2.22	77265			26.94	97362			33.95	189393	66.05
58	100421	5794		5.77	28732			28.61	1953			1.94	25105			25.00	38838			38.68	61583	61.32
64	187266	10804		5.77	52018			27.78	2601			1.39	49417			26.39	72426			38.68	114840	61.32
4	122260	7053		5.77	30565			25.00	1698			1.39	29546			24.17	53397			43.68	68863	56.32
ka	174176	10049		5.77	50132			28.13	3156			1.74	45333			25.63	65506			38.74	108670	61.26
jaksotusmenetelmällä lasketut tierakenteiden kestoiät		KEVÄT			KESÄ1			KESÄ2			SYKSY			venymät 15 % syksystä TALVI: -5 C			sigma ni/Ni			kestoiät vuotta		
		epsilon	N	n/N	epsilon	N	n/N	epsilon	N	n/N	epsilon	N	n/N	epsilon	N	n/N						
53	AB	0.000133	2.78E+07	5.94E-04	0.00015	4.12E+07	2.17E-03	0.000195	4.12E+07	1.55E-04	0.000109	3.41E+07	2.26E-03	1.64E-05	2.08E+11	4.68E-07	5.18E-03	193.0				
	pohjamaa	0.000165	2.62E+08	6.31E-05	9.11E-05	2.82E+09	3.16E-05	9.87E-05	2.05E+09	3.11E-06	9.54E-05	2.35E+09	3.29E-05	1.43E-05	4.64E+12	2.10E-08	1.31E-04	7652.1				
58	AB	0.00024	1.46E+06	3.98E-03	0.000258	2.73E+06	1.05E-02	0.00037	1.67E+06	1.17E-03	0.000187	2.30E+06	1.09E-02	2.81E-05	1.40E+10	2.78E-06	2.66E-02	37.6				
	pohjamaa	0.000371	1.03E+07	5.64E-04	0.000253	4.75E+07	6.05E-04	0.00028	3.16E+07	6.17E-05	0.000261	4.19E+07	5.99E-04	3.92E-05	8.28E+10	4.69E-07	1.83E-03	546.2				
64	AB	0.000255	1.07E+06	1.01E-02	0.000289	1.55E+06	3.36E-02	0.000388	1.32E+06	1.97E-03	0.000207	1.38E+06	3.58E-02	3.11E-05	8.42E+09	8.60E-06	8.14E-02	12.3				
	pohjamaa	0.000277	3.30E+07	3.27E-04	0.000149	3.95E+08	1.32E-04	0.000158	3.12E+08	8.33E-06	0.000159	3.04E+08	1.62E-04	2.39E-05	6.01E+11	1.20E-07	6.30E-04	1587.9				
4	AB	0.000232	1.72E+06	4.09E-03	0.000244	3.61E+06	8.46E-03	0.000289	5.76E+06	2.95E-04	0.000196	1.82E+06	1.63E-02	2.94E-05	1.11E+10	4.83E-06	2.91E-02	34.3				
	pohjamaa	0.000235	6.38E+07	1.11E-04	0.000151	3.74E+08	8.17E-05	0.000162	2.82E+08	6.01E-06	0.000163	2.76E+08	1.07E-04	2.45E-05	5.44E+11	9.81E-08	3.06E-04	3271.5				
kunkin vuodenajan aikana tapahtuvan väsymisen suhde vuodenajan liikennemäärään		KEVÄT			KESÄ1			KESÄ2			SYKSY			TALVI								
		osuus, %			kk/ liikenne	osuus, %			kk/ liikenne	osuus, %			kk/ liikenne	osuus, %						kk/ liikenne		
	liik.	kk:sta		liik.	kk:sta		liik.	kk:sta		liik.	kk:sta		liik.	kk:sta		liik.	kk:sta					
53	AB	5.77	11.47	1.99	31.11	41.84	1.34	2.22	2.99	1.34	26.94	43.69	1.62	33.95	0.01	0.00						
	pohjamaa	5.77	48.25	8.36	31.11	24.18	0.78	2.22	2.38	1.07	26.94	25.18	0.93	33.95	0.02	0.00						
58	AB	5.77	14.97	2.60	28.61	39.52	1.38	1.94	4.39	2.26	25.00	41.10	1.64	38.68	0.01	0.00						
	pohjamaa	5.77	30.83	5.34	28.61	33.06	1.16	1.94	3.37	1.73	25.00	32.72	1.31	38.68	0.03	0.00						
64	AB	5.77	12.36	2.14	27.78	41.25	1.49	1.39	2.42	1.74	26.39	43.96	1.67	38.68	0.01	0.00						
	pohjamaa	5.77	51.93	9.00	27.78	20.93	0.75	1.39	1.32	0.95	26.39	25.79	0.98	38.68	0.02	0.00						
4	AB	5.77	14.05	2.44	25.00	29.05	1.16	1.39	1.01	0.73	24.17	55.87	2.31	43.68	0.02	0.00						
	pohjamaa	5.77	36.19	6.27	25.00	26.73	1.07	1.39	1.97	1.42	24.17	35.08	1.45	43.68	0.03	0.00						
keskiarvo																						
	kaikki	5.77	27.51	4.77	28.13	32.07	1.14	1.74	2.48	1.41	25.63	37.92	1.49	38.74	0.02	0.00						
	ab		13.21	2.29		37.92	1.34		2.70	1.52		46.16	1.81		0.01	0.00						
	pohjamaa		41.80	7.24		26.23	0.94		2.26	1.29		29.69	1.17		0.02	0.00						

Asfaltin alapinta

Vauriosumma = 20m²

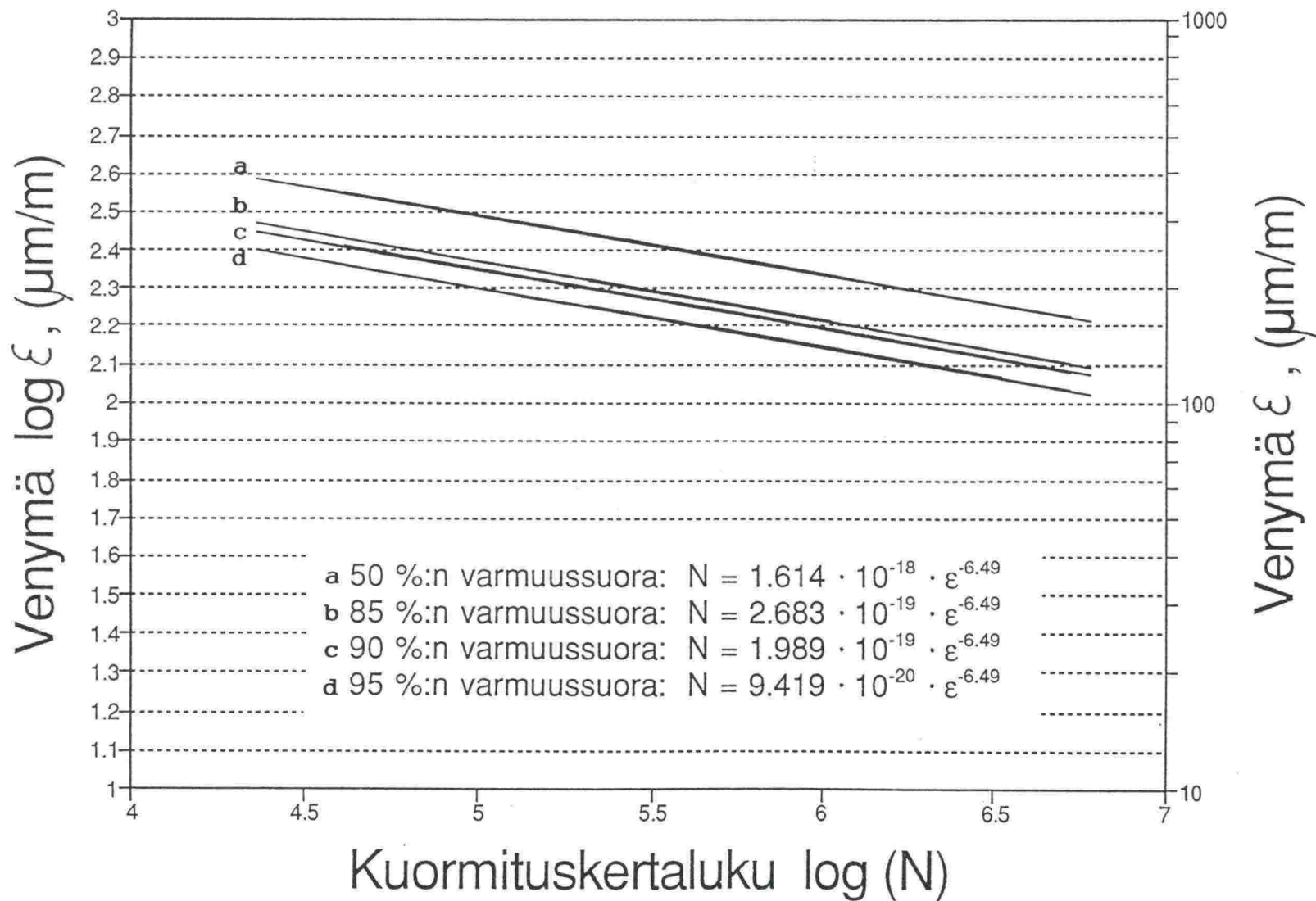


Asfaltin alapinta Vauriosumma = 40m²



Asfaltin alapinta

Vauriosumma = 70m²



TIEHALLITUKSEN SISÄISIÄ JULKAISUJA

- 1/1991 Kerrosten laatuvirheiden esto. Tampereen tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 5/1991 Massanvaihdon korvaaminen moreenitukiseinällä. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 6/1991 Havupuuhake pengertäytteenä. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 13/1991 Tieverkkojen asentaminen, käytännön ohjeita. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 15/1991 Vairioinventoinnin tulosten käsittelyohjelmistot, lomake, mittari ja siirto. Tampereen tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 16/1991 Asfalttimassan suhteitus Marshal-menetelmän mukaan. Geopalvelukeskus
- 17/1991 Murskeen muodonmuutosominaisuudet tien rakennekerroksissa. Geopalvelukeskus
- 20/1991 Routavaurio- ja kuivatustutkimus; Kalliokohdetutkimus. TIEL 4000003
- 21/1991 Routavaurio- ja kuivatustutkimus; Pituushalkeamat osa I, Routanousun vaikutus halkeamatodennäköisyyteen. TIEL 4000004
- 22/1991 Routavaurio- ja kuivatustutkimus; Pituushalkeamat osa II, Tien rakenne- ja olosuhdetekijöiden vaikutus tien routanousuihin. TIEL 4000005
- 23/1991 Betonipäällysteen seuranta; Raportti suunnittelusta ja rakentamisesta. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 25/1991 Tiivistyskurssi; Maarakenteiden tiivistäminen. Tampereen tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 26/1991 Omajohtoisissa töissä käytetyn tiivistyskaluston nykytilaselvitys vuosilta 1987-90. Tampereen tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 27/1991 Sorateiden kelirikkovaurioiden korjaaminen, väliraportti I. Kuopion tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 32/1991 Moreenin käyttö tierakenteissa. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 20/1992 Vanhojen tienrakennekerrosten uudelleen käyttö. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 26/1992 Kalliomurskeiden käyttö sitomattomissa rekennekerroksissa, esiselvitys. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 32/1992 Sorateiden kelirikkovaurioiden korjaaminen, väliraportti II; Prosessikipsin ja biotiitin materiaalitutkimukset. Kuopion tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 34/1992 Routavaurio- ja kuivatustutkimus; Pituushalkeamat osa III, Elävät pituushalkeamat ja niiden syntymistodennäköisyys routivassa tierakenteessa. TIEL 4000017
- 35/1992 Routavaurio- ja kuivatustutkimus; Kuivatustutkimus osa I sekä roudan syvyys-havainnot. TIEL 4000018
- 42/1992 Pehmeikölle perustettavan tiepenkereen geotekniset laskelmat. Geopalvelukeskus
- 43/1992 Pehmeikölle rakennettavien tieleikkausten geotekniset laskelmat. Geopalvelukeskus
- 44/1992 Saven varaan perustetut alikulkukäytävät. Geopalvelukeskus
- 45/1992 Tielaitoksen pudotuspainolaitteiden vertailu; Saarijärvi 8 - 9.7.1992. TIEL 4000023

TIELAITOKSEN SISÄISIÄ JULKAISUJA

- 10/1993 Päällystetyn tieverkon kuntomittaukset ja hallintajärjestelmät. Tuotannon palvelukeskus

TIELAITOKSEN TUTKIMUKSIA

- 3/1992 Viipurin batoliitin eri rapakivityyppien soveltuvuus tienpäällyste-
kiviaineeksi. TIEL 3100004
- 4/1992 Tiepenkereen holvautuminen, loppuraportti. TIEL 3100005

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 22/1992 Quality Requirements of Prefabricated Strip Drains; Quality Control
and Test Methods. TIEL 3200057E
- 46/1992 Syvästabiloinnin laadunvalvontaohje. TIEL 3200099
- 62/1992 Hienoaineksen vaikutus stabiloidun moreenimurskeen pakkas-
kestävyyteen. TIEL 3200112
- 68/1992 Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelma (TPPT),
perussuunnitelma. TIEL 3200118
- 69/1992 Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus.
TIEL 3200119
- 1/1993 Arktinen tienrakentaminen. TIEL 3200121
- 8/1993 Sitomattoman kantavan kerroksen rakentaminen. TIEL 3200135
- 15/1993 Masuunikuonan käyttö sitomattomissa päällysrakennekerroksissa.
TIEL 3200142
- 19/1993 Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskeva seurantatutkimus. TIEL 3200145
- 20/1993 Moreeni ja sen käyttö. TIEL 3200146
- 26/1993 Bentoniittimattojen ja muovikavojen kelpoisuus pohjaveden suojaukseen,
tutkimuksia ja suosituksia. TIEL 3200152
- 35/1993 Strategic Highway Research Program (SHRP) - Long-Term Pavement
Performance (LTPP); Koeteillä tehdyt mittaukset vuonna 1992 ja tieraken-
teen vaurioitumiseen vaikuttavat tekijät. TIEL 3200160
- 38/1993 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet;
Kirjallisuusselvitys. TIEL 3200163
- 39/1993 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet;
Esiselvitysvaiheen kuormituskokeet. TIEL 3200164
- 40/1993 Teiden tasaisuusmittareiden vertailu; PTM:n; Roadmanin ja Dipstickin
laitevertailu sekä epätasaisuuksien vaikutus tierasitukseen. TIEL 3200165
- 41/1993 Stabiloidun materiaalin maksimiraekoon sekä koekappaleen koon ja
muodon vaikutus puristuslujuuteen. TIEL 3200166
- 2/1993 *Geotekniikan informaatiojulkaisuja:*
Massanvaihto. TIEL 3200127
- 21/1993 Pengerpaalutus. TIEL 3200147
- 23/1993 Pohjanvahvistusmenetelmän valinta. TIEL 3200149
- 24/1993 Tiegeotekniikan yleiset suunnitteluperusteet. TIEL 3200150